



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL  
ESTADO DE HIDALGO



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS  
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

“DISEÑO DE UNA ANTENA PARA DISPOSITIVOS RFID EN LA  
FRECUENCIA DE 13.56 MHz”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES.

PRESENTA:

SERRANO ROMERO ALEJANDRO

ASESOR:

DR. ESTEBAN RUEDA SORIANO

CO-ASESOR:

DR. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ VIDAL



OFICIO EYT/387/15

**P.D.I.E.T. ALEJANDRO SERRANO ROMERO**

**PRESENTE**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al trabajo de titulación **“DISEÑO DE UNA ANTENA PARA DISPOSITIVOS RFID EN LA FRECUENCIA DE 13.56 MHz”** y que después de revisarlo en reunión de sinodales, han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:	Dr. José Luis González Vidal
PRIMER VOCAL:	Dr. Esteban Rueda Soriano
SEGUNDO VOCAL:	Dra. Karina Alemán Ayala.
TERCER VOCAL:	Dr. Heberto Gómez Pozos.
SECRETARIO:	Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas.
PRIMER SUPLENTE:	Ing. Iván Erick Aguilar Castillo.
SEGUNDO SUPLENTE:	Dr. Obed Pérez Cortés.

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**ATENTAMENTE.**  
**“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”**  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 05 de Noviembre de 2015.



**Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas**  
**Coordinador de la Licenciatura en Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones**  
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
 Área Académica de Computación y Electrónica

C.c.p. Archivo



Coordinación Ingeniería en Telecomunicaciones  
 Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 ext. 6320  
 grojas@uaeh.edu.mx

[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

*A mis padres y Hermanos por su apoyo  
incondicional.*

## Agradecimientos

A todos mis catedráticos de la universidad que gracias a sus enseñanzas y paciencia me dieron las herramientas necesarias para mejorar profesionalmente y personalmente, en especial agradecimiento al doctor Esteban Rueda Soriano por su asesoría y apoyo.

## **Prologo**

Este trabajo está enfocado al diseño de una antena para una etiqueta pasiva de un sistema RFID que trabaja a 13.56 MHz HF y de alimentación pasiva, es decir no posee alimentación externa.

El marco teórico de este trabajo especifica los parámetros que se deben tomar en cuenta para plantear el análisis de la antena. Existen diversos principios físicos importantes que afectan a los sistemas RFID.

Se hace referencia, en modo de comparación, a los diferentes tipos de sistemas de identificación haciendo hincapié en la “batalla” por el mercado entre los códigos de barras y los sistemas de RFID.

Así como todas las tecnologías, tienen organismos de regulación y estandarización que también son mencionados.

## **Introducción**

Desde inicios de este siglo, el éxito rotundo en el desarrollo de los primeros sistemas RFID ha impresionado a varios investigadores y empresas de alto renombre como una nueva manera para establecer el intercambio de información a través de una comunicación remota. La tecnología RFID ofrece una comunicación remota a través de etiquetas que son adheribles a casi cualquier objeto y actualmente se han encontrado un sin número de aplicaciones, tales como identificación vehicular, de productos, de personas, rastreo, monitoreo, entre otras. Un sistema RFID está integrado por un lector, el medio y la etiqueta, que a su vez, la integran una antena y un chip. La tecnología RFID. Al realizar estudios y aplicaciones con esta nueva tecnología se es posible imaginar que dentro de algunos años se ocupada en cualquier lugar desplazando así los actuales sistemas de detección como por ejemplo el código de barras.

## **Objetivo**

Diseñar una antena que sea capaz de detectar una tarjeta RFID a una frecuencia de 13.56 Mhz.

Objetivos particulares:

- Comprender el funcionamiento de las antenas receptoras RFID.
- Diseñar una antena RFID capaz de detectar Tags a una frecuencia de 13.56 Mhz y mejorar el alcance de detección.

## **Justificación**

La investigación que se realiza en este trabajo se basa principalmente en buscar los parámetros indicados para el correcto funcionamiento de un lector de sistemas RFID en la frecuencia de 13.56 Mhz con el cual nos permitirá una mejor comprensión acerca del funcionamiento de los mismos ya que en la actualidad los sistemas RFID son más frecuentes en las empresas, organizaciones o instituciones que demandan un sistema de rastreo, monitoreo o seguimiento de algún producto o personal para la eficiencia de sus operaciones que a su vez requiere que su proceso sea rápido y eficaz siendo los sistemas de RFID óptimos para el control que se requiera ya que no se necesita una línea de vista con el objeto o persona que se desea rastrear.

Es por ello que los sistemas de RFID necesitan un campo más amplio de estudio para que la interacción entre la antena y el chip (tag) sea el correcto y en cualquier punto exista una correcta interacción entre el emisor (tag) y el receptor (antena).

## **Hipótesis**

Si se encuentra la física y matemáticas adecuadas que se utilizan para el diseño de una antena RFID podremos mejorar el alcance, la selectividad, el ancho de banda, el factor de calidad que deseamos obtener para la detección de dispositivos que operan en la frecuencia de 13.56 Mhz.

## **Alcance**

Realizar los cálculos correspondientes para mejorar el alcance y la detección de nuestra tag en la frecuencia de 13.56 Mhz con la que opera nuestro sistema RFID.

## Narrativa

- El proyecto se llevó a cabo de acuerdo a un mapa de actividades organizadas y definidas en intervalos de tiempo, las cuales formaron el cuerpo del proyecto a un ritmo adecuado que condujo un progreso congruente para finalmente entregar resultados concretos y precisos.
- **Estado del arte.** sistema RFID. En este apartado se introduce a la tecnología RFID, se explica su funcionamiento.
- **Antena de la etiqueta.** En esta parte, se enfoca el proyecto hacia el análisis de una antena pasiva para la etiqueta RFID para posteriormente indicar los principales parámetros que debe cumplir su diseño.
- **Construcción y mediciones.** En esta parte se construyen una antena y se realizan las mediciones correspondientes para comparar los cálculos realizados con la realidad.
- **Conclusiones.** Plantea las experiencias y conocimientos concretos adquiridos durante el desarrollo del proyecto así como la comprobación de la hipótesis.

**Índice**

<b>Capítulo 1. Sistema RFID</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedente_____	1
1.2 Componentes de un sistema RFID_____	4
1.3 Antenas_____	8
1.4 Funcionamiento principal de un sistema RFID_____	9
1.5 Aplicaciones_____	18
1.6 Estándares_____	19
<b>Capítulo 2. Principios físicos para el desarrollo de la antena RFID</b>	<b>21</b>
2.1 Campo magnético_____	21
2.2 Inductancia_____	31
2.3 Ley de Faraday_____	36
2.4 Voltaje inducido $v_L$	37
2.5 Resonancia_____	41
2.6 Factor de calidad $Q$ _____	43
2.7 Curva $Z_T$ contra frecuencia_____	44
2.8 Selectividad_____	46
2.9 Funcionamiento de un transponder	51

<b>Capítulo 3. Desarrollo</b>	54
3.1 Lectores_____	55
3.2 Polarización_____	56
3.3 Acoplamiento inductivo_____	57
3.4 Patrones de radiación_____	57
3.5 Cálculos_____	58
3.6 Capacitor_____	60
3.7 Inductor_____	60
3.8 Circuito resonante en serie	63
3.9 Factor de calidad_____	64
3.10 Frecuencias de corte y ancho de banda_____	64
3.11 Transponder_____	66
3.12 Voltaje inducido_____	70
3.13 Rango de energía_____	71
<b>Capítulo 4. Resultados</b>	73
4.1 Discusión de resultados	74
4.2 Conclusiones	74
<b>Referencias</b> _____	76
<b>Anexo 1</b> _____	78

<b>Índice de figuras</b>	<b>Página.</b>
Figura 1.1. Esquema de un transponder RFID (Jose María Ciudad Herrera, 2007)	5
Figura 1.2. Lectores de RFID (a) bobina simple; (b) doble bobina (Youbok Lee)	7
Figura 1.3. Propagación del campo magnético en una antena RFID (Juan, 2010)	8
Figura 1.4. Patrones de radiación en una antena RFID (Intermec, 2010)	9
Figura 1.5. Polarización de la antena (a) polarización lineal, (b) polarización elíptica, (c) polarización circular (Wayne, 2003)	9
Figura 1.6. Esquema de un sistema RFID (Youbok Lee)	10
Figura 1.7. Acoplamiento inductivo entre el lector y el transponder (Bettezzati, 2005)	12
Figura 1.8. Generación de un Load Modulation (Bettezzati, 2005)	14
Figura 1.9. Generador de modulación de carga con subportadora en sistema de acoplamiento inductivo (Bettezzati, 2005)	15
Figura 1.10. Bandas de corte creadas por load modulation (Bettezzati, 2005)	16
Figura 1.11. Diseño de un transponder utilizando subarmónicos (Bettezzati, 2005)	16
Figura 1.12. Esquema de funcionamiento de un sistema de acoplamiento backscatter (Bhuptani Manish, 2005)	17

Figura 2.1. Distribución campo magnético en un imán permanente (Boylestad, 2011)	22
Figura 2.2. Distribución del flujo de dos polos opuestos norte-sur (Boylestad, 2011)	22
Figura 2.3. Densidad de flujo B (Boylestad, 2011)	23
Figura 2.4. Campo magnético de un bucle de corriente (Nave, 2001)	27
Figura 2.5. Campo magnético en el centro de un bucle de corriente (Nave, 2001)	28
Figura 2.6. Campo magnético en el eje del bucle de corriente (Nave, 2001)	29
Figura 2.7. Geometría del campo en el eje del bucle de corriente (Nave, 2001).	30
Figura 2.8. Definición de los parámetros de la ecuación 1.4 (Boylestad, 2011)	31
Figura 2.9. Bobina rectangular con n vueltas (Youbok Lee)	33
Figura 2.10. Una línea recta de un conductor (Youbok Lee)	34
Figura 2.11. Bobina de un cable recto vista de la sección transversal (Youbok Lee)	35
Figura 2.12. Voltaje inducido a través de una superficie (Nave, 2001)	36
Figura 2.13. Generación de un voltaje por el movimiento de un conductor a través de un campo magnético (Boylestad, 2011)	37
Figura 2.14. Demostración de la ley de Faraday (Boylestad, 2011)	37

Figura 2.15. Demostración del efecto de la ley de Lenz (Nave, 2001)	38
Figura 2.16. Circuito resonante en serie (Boylestad, 2011)	41
Figura 2.17. Reactancia inductiva contra frecuencia (Boylestad, 2011)	46
Figura 2.18. Curva I contra frecuencia del circuito resonante en serie (Boylestad, 2011)	47
Figura 2.19. Circuito regulador de voltaje en un transponder (Jose María Ciudad Herrera, 2007)	52
Figura 2.2. Zonas de interrogación de un transponder en diferentes alineamientos (Jose María Ciudad Herrera, 2007)	54
Figura 3.1. Lectores de RFID (a) bobina simple (Youbok Lee)	56
Figura 3.2. Orientación dependiendo del tag de la antena (Youbok Lee)	56
Figura 3.3. Acoplamiento inductivo (es.wiki2.org, 2015)	57
Figura 3.4. Patrón de radiación omnidireccional (Intermec, 2010)	57
Figura 3.5. Load Modulation (Bettezzati, 2005)	58
Figura 3.6. Arreglo de capacitores	61
Figura 3.7. Medición de la bobina creada	62
Figura 3.8. Medición de la bobina creada	63
Figura 3.9. Medición de la $R_L$	63
Figura 3.10. Circuito RF (Craig Ross, 2003)	67
Figura 3.11. Medición de la corriente a través de la bobina	68

Figura 3.12. Oscilador de cristal frecuencia 13.56 MHz (Craig Ross, 2003)  
\_\_\_\_\_69

Figura 3.13. Comprobación de la frecuencia del circuito oscilador  
\_\_\_\_\_70

## **Índice de tablas**

## **Página.**

Tabla 1.1. Rango de operación de los sistemas RFID (González, 2008)  
\_\_\_\_\_6

Tabla 1.2. Aplicaciones de los sistemas RFID \_\_\_\_\_18

Tabla 1.3. Estándares ISO para RFID (ISO, 2015) \_\_\_\_\_20

Tabla 1.4 Resultados de la antena diseñada \_\_\_\_\_74

Tabla 1.5 Características de lector grabador KRD13M (Ferákmon, s.f.)  
\_\_\_\_\_74

Tabla 1.6 Características Lector PcProx Plus (RFIDeas, s.f.) \_\_\_\_\_74

Tabla 1.7 Características lector RFID NFC – SL600 (Stronglink, s.f.).  
\_\_\_\_\_75

## **Acrónimos**

**RFID.** Identificación por radio frecuencia (Radio Frequency IDentification).

**IFF.** Identificación amigo o enemigo (Identify Friend or Foe).

**EAS.** Sistema electrónico de vigilancia (Electronic Article Surveillance).

**ROM.** Medio de almacenamiento utilizado en ordenadores y dispositivos electrónicos, que permite solo la lectura de la información y no su escritura (Read-Only Memory).

**RAM.** Memoria de acceso aleatorio (Random Access Memory).

**Mw.** Mili watts.

**LF.** Baja frecuencia (Low Frequency).

**HF.** Alta frecuencia (High Frequency).

**UHF.** Ultra alta frecuencia (Ultra High Frequency).

**RF.** Radio frecuencia (Radio Frequency).

**TEM.** Transversales electromagnéticas.

**Transistor FET.** Transistor de efecto de campo (Field-Effect Transistor).

**CA.** Corriente alterna

**CC.** Corriente continua.

**CGS.** Sistema cegesimal.



## Capítulo 1. El sistema RFID

### 1.1 Antecedentes

El antecedente más importante de la tecnología identificación por radiofrecuencia por sus siglas en inglés RFID (Radio Frequency IDentification) es el código de barras, por más de 25 años se ha usado el código de barras para la identificación de objetos, pero hoy en día el código de barras tienen muchas limitaciones al operar como se esperaría, la tecnología RFID funciona sin necesidad de visión directa como operan los códigos de barras y así poder identificar cualquier elemento (Glover, 2006).

La tecnología no tiene definido su historia ni un descubridor, se ha hecho posible con la aportación de numerosos investigadores y a los avances tecnológicos en otros campos. La tecnología RFID ha ido evolucionando pasando de apariciones en artículos de revistas científicas a toda una realidad (González, 2008).

Leon Theremin es conocido como el primer inventor del dispositivo RFID al utilizarlo como una herramienta de espionaje por parte del gobierno ruso en 1945, una vez finalizada la segunda guerra mundial. Pero no es el caso ya que el dispositivo de Theremin era un dispositivo de escucha encapsulado pasivo; es decir, sólo percibía sonido, y no lo emitía, no era un dispositivo RFID como lo conocemos hoy en día (González, 2008).

La tecnología RFID ha sido empleada desde el inicio de 1939. En la segunda guerra mundial los británicos deseaban distinguir sus aviones de regreso a las bases y de sus enemigos que los atacaban desde la costa francesa, a una distancia menor de 40 kilómetros. Se hacía colocar una antena en el fuselaje de los aviones, de tal manera que hicieran una respuesta a una señal interrogación y así podrían determinar si era un avión “amigo” o “enemigo” (González, 2008).

A este sistema se le conoció como IFF, Identify Friend or Foe (identificación amigo o enemigo), siendo el sistema comercial y privado por el cual se basaban. Fue el primer uso obvio de la tecnología identificación por radiofrecuencia (RFID) (González, 2008).



En la década de los 50 la tecnología RFID se desarrolló al mismo paso que lo hicieron la radio y el radar en años anteriores. La tecnología de la radiofrecuencia se vio impulsada con los trabajos de los transmisores de largo alcance, como Application of microwave homodyne (creado por F.L Vernon) y Radio transmission systems with modulated. Passive responder (inventado por D.B Harris) fueron una parte importante para que la tecnología RFID dejase de ser solo una idea y se convirtiera en realidad (González, 2008).

En la década de los 60 se considera como el inicio de la explosión que se originaría en la siguiente década. La actividad comercial tuvo participación y realizaron números estudios. El Sistema Electrónico de Vigilancia EAS (Electronic Article Surveillance) fue el primero para detectar robos en grandes almacenes. El sistema contenía solo un bit de información, para localizar la etiqueta o no detectarla dentro de un radio del lector y hacer sonar una alarma acústica en el caso donde la etiqueta no desactivada sea detectada por el alcance del lector. Son colocados de tal forma que el cliente tiene que pasar por los lectores para poder salir del establecimiento. Son económicos y efectivos a pesar de sus limitaciones y este se empezó a extender de manera rápida (González, 2008).

En la década de los 70 se hicieron avances significativos aportados por diferentes instituciones tales como Los Alamos Scientific Laboratory, Northwestern University y el Microwave Institute Fundation sueco. Se probaron varias aplicaciones al principio de la década para la logística y el transporte, como los empleados por el puerto de New York y New Jersey, aplicaciones para el rastreo de automóviles. En la década de los 70 hubo un gran desarrollo en los sistemas RFID (enfocado a aplicaciones de seguimiento de ganado, vehículos y la automatización industrial) basados en microondas en los EUA (Estados Unidos de America) y sistemas inductivos en Europa. La creación de nuevas empresas dedicadas a la tecnología RFID iba en aumento (González, 2008).

En los años 70's se obtuvo la primera aplicación importante de RFID, con un transponder de radio pasivo el cual contenía 16 bits de memoria, el cual era denominado pasivo, fue demostrado en New York en 1971, el cual constaba de Radio Frecuencia, Sonido y Luz como medio de transmisión, y se planeaba implementarlo en los sectores tales como el transporte (identificación de vehículos, sistemas automáticos de peajes), banca (chequera electrónica, tarjetas de crédito electrónicas), seguridad (identificación



del personal, puertas automáticas y vigilancia) y en el sector de la salud (identificación, historial del paciente) (Bhuptani Manish, 2005).

En la década de los 80 llegó la implantación de los estudios y desarrollos logrados en décadas anteriores. En EUA se interesaron por aplicaciones en el transporte, accesos y en menor grado en los animales. En los países europeos como España, Francia, Italia y Portugal se centraron más en aplicaciones orientadas a la industria y sistemas de corto alcance para el control de animales (González, 2008).

En la década de los 90 en EUA se comenzó a utilizar el pago de peaje con el control electrónico en las autopistas de Houston y Oklahoma (González, 2008).

En Europa también se investigó este campo y se usaron sistemas de microondas e inductivos para controles de acceso y billetes electrónicos (González, 2008).

Texas Instruments (TI) llevó de la mano con la tecnología RFID un sistema de control de encendido del automóvil (González, 2008).

Apareció también un sistema de Phillips que permitía el encendido, control del combustible, y control de acceso al vehículo, entre otras acciones (González, 2008).

El avance de la tecnología durante esta década fue posible a los desarrollos tecnológicos en otros campos que permitieron fabricar cada vez equipos más pequeños con más memoria, con mayor alcance y abaratando los costos de fabricación. (González, 2008).

En 1999 se formó un consorcio de empresas y científicos llamada Auto-ID Center (Automatic Identification). La principal idea era de formar una red de productos que permitan la posibilidad de conocer si el producto está en la cadena de producción, en algún contenedor de transporte, o si ha sido vendido. La identificación RFID es la combinación de la tecnología de la radiofrecuencia o radiodifusión con el radar (Violino, 2005).

Entre 1999 y 2003, el Auto-ID Center han conseguido el apoyo de más de 100 grandes empresas de los usuarios finales, además del Departamento de Defensa de EE.UU. y muchos de los principales proveedores RFID. Laboratorios de investigación que abrió en Australia, el Reino Unido, Suiza, Japón y China. Se desarrollaron dos protocolos de interfaz aire (Clase 1 y Clase 0), el Código Electrónico de Producto (EPC) sistema de



numeración y una arquitectura de red para la búsqueda de los datos asociados en una etiqueta RFID en el Internet (Violino, 2005).

La tecnología fue autorizada para el Consejo de Códigos Uniformes en el año 2003, y el Consejo de Códigos Uniformes creado EPCglobal, como una empresa de riesgo compartido con EAN Internacional, para comercializar la tecnología EPC. El Auto-ID Center cerró sus puertas en octubre de 2003, y sus tareas de investigación se transfieren a Auto-ID Labs (Violino, 2005).

## **1.2 Componentes de un sistema RFID**

La tecnología RFID la podemos definir como la identificación de un objeto único mediante la comunicación entre un lector y una etiqueta inalámbricamente. Esta contiene una antena y un chip capaz de almacenar información. A este chip se le conoce como transponder (o tag) y esta adherido a los objetos por identificar. El lector manda una serie de ondas de radiofrecuencia al tag, que son captadas por su micro antena:

1. Las ondas activan el chip, el cual a través de la micro antena y mediante ondas de radiofrecuencia transmiten al lector la información que tenga en su memoria.
2. Finalmente, el lector recibe la información que tiene el tag y lo envía a una base de datos en la que previamente se han registrado las características del producto o puede procesarlo según convenga cada aplicación.

La comunicación que existe entre el lector y la etiqueta se realiza por medio de señales de radio frecuencia. La comunicación puede tener características diferentes dependiendo del rango de frecuencia, el tipo de antena utilizada, el tipo de etiquetas entre otros parámetros (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

### **Transponder, etiqueta o tag.**

La palabra transponder deriva de las palabras en inglés TRANSmitter/resPONDER, términos que hacen referencia al funcionamiento de la tecnología. Los componentes básicos de un transponder son (figura 1.1) (Jose María Ciudad Herrera, 2007):

- Una memoria no volátil donde se almacenan datos.



- Una memoria ROM donde se almacenan instrucciones básicas para su funcionamiento, como son temporizadores, controles de flujo de datos, etc.
- También pueden incorporar memoria RAM para almacenar datos durante la comunicación con el lector.
- La antena por la cual detecta el campo creado por el diseñador de la aplicación, y del que extrae energía para su comunicación con él.
- Otros componentes electrónicos que procesan la señal de la antena y para el proceso de datos, como buffers, filtros etc.

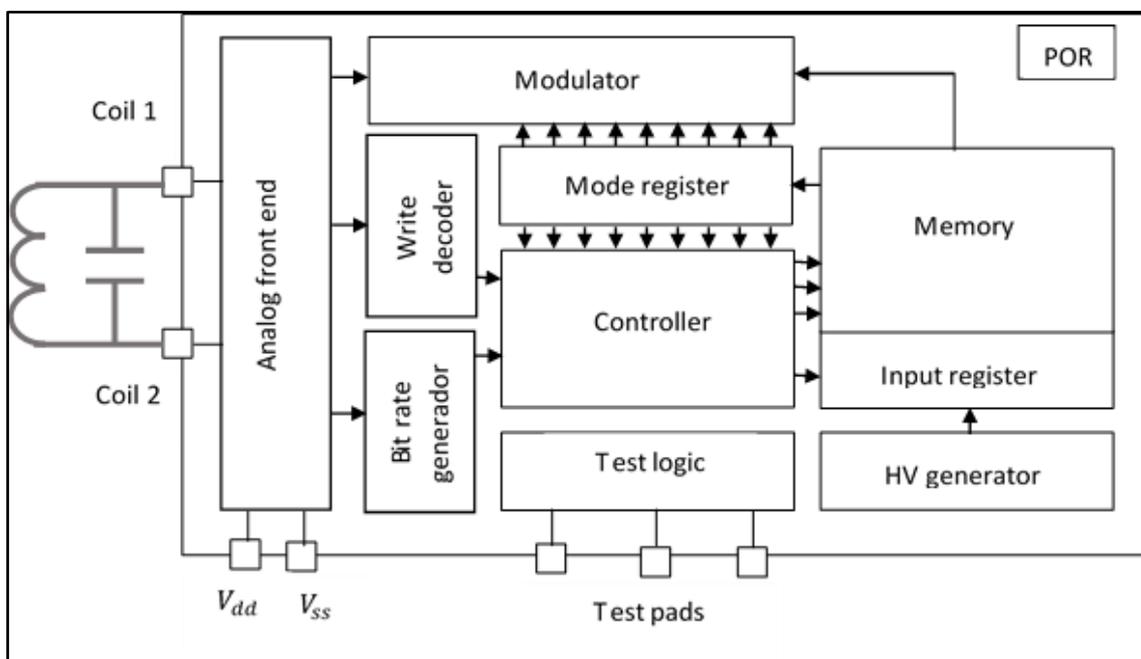


Figura 1.1. Esquema de un transponder RFID (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

### Alimentación o Potencia.

Para el funcionamiento de los transponders son requeridas pequeñas cantidades de energía (micro watts Mw). Se pueden clasificar como (Jose María Ciudad Herrera, 2007):

- **Pasivos.** son aquellos que se alimentan de la energía del campo magnético generado por el lector.



- **Activos.** son aquellos que necesitan una mayor fuente de energía que se obtiene mediante fuentes de batería adicionales. La ventaja que presentan este tipo de etiquetas es que tienen un alcance mayor ya que no dependen del lector para que active la comunicación, sin embargo la vida útil de estas etiquetas es limitada y el costo es mayor se puede alcanzar hasta 5 veces que una etiqueta pasiva.

### **Frecuencias y velocidades de transmisión.**

Las etiquetas operan en un rango de frecuencias determinado por ello dada la siguiente clasificación (González, 2008) véase tabla 1.1:

- LF. baja frecuencia (low frequency) es el rango de 120 KHz-134 KHz estos tags suelen ser muy utilizados en accesos a edificios.
- HF. alta frecuencia (high frequency) es el rango de los 13.56 MHz una frecuencia conocida como la banda médica, industrial y científica (ISM por sus siglas en inglés). La problemática de estos tags es que tienen un rango de lectura corto alrededor de los 30 cm.
- UHF. ultra alta frecuencia (ultra high frequency). Opera en el rango de frecuencia de 868 MHz-956 MHz el mismo rango de frecuencias que los teléfonos inalámbricos y algunos teléfonos celulares. Las etiquetas RFID de UHF se emplean principalmente en cadenas de suministros y aplicaciones de detallistas. La ventaja de este tipo de etiquetas es que pueden ser detectadas a una distancia mayor a tres metros y se pueden leer etiquetas al mismo tiempo.
- Microondas (microwave) en el rango de 2.45 GHz.

A mayor frecuencia significa una mayor velocidad en la transmisión de datos. es por eso que a la hora de implementar un sistema RFID es importante tener en cuenta la frecuencia de operación (González, 2008).

Tabla 1.1. Rango de operación de los sistemas RFID (González, 2008).

<i>Espectro de frecuencia</i>	<i>Rango de operación</i>	<i>Rango de lectura</i>
<i>Baja frecuencia LF (low Frequency)</i>	<i>30 - 300 KHz</i>	<i>10 cm</i>
<i>Media frecuencia MF (Medium Frequency)</i>	<i>300 KHz -3 MHz</i>	<i>20 cm</i>



Alta frecuencia HF (High Frequency)	3 MHz - 30 MHz	1 metro
Ultra alta frecuencia UHF (Ultra High Frequency)	300 MHz - 3 GHz	Hasta 3 metros
Super alta frecuencia SHF (Super High Frequency)	3 - 30 GHz	Hasta 10 metros

### Lectores

Los lectores (readers) son aquellos que envían una señal de radiofrecuencia para detectar las posibles etiquetas que se encuentren dentro del rango de lectura en su fabricación se separan en dos tipos (González, 2008) véase figura 1.2:

- Sistemas con bobina simple, son empleados para la transmisión de energía como de datos.
- Sistemas interrogadores con dos bobinas, una encargada de la transmisión de la energía y otra para los datos.

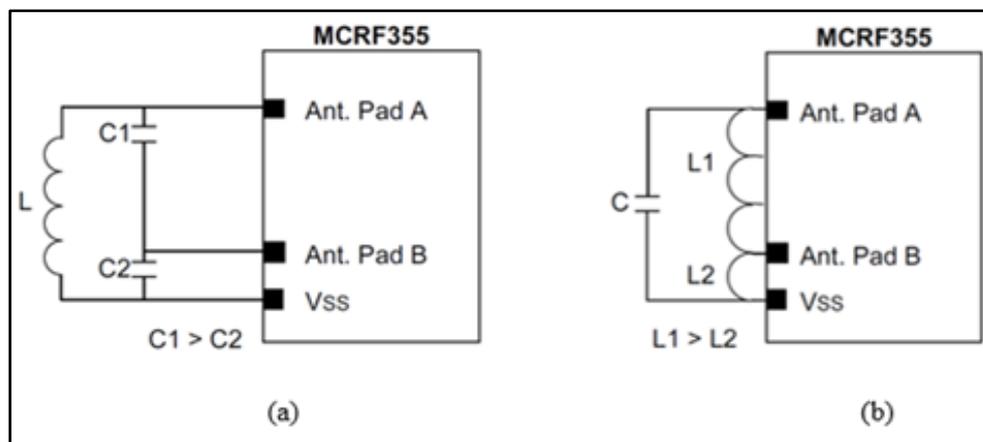


Figura 1.2. Lectores de RFID (a) bobina simple; (b) doble bobina (Youbok Lee).



### 1.3 Antenas

La antena es un elemento importante dentro de la tecnología RFID ya que es la encargada de la interacción entre la etiqueta y el lector, la antena es aquella que transforma las corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas y transforma las ondas en corrientes oscilantes, esto genera una acción que forma un campo magnético a su alrededor, la importancia de la antena es lograr un radio de detección máximo posible, aumentar la densidad del campo electromagnético, mejorar su rango de lectura , como se puede observar en la figura 1.3 (González, 2008).

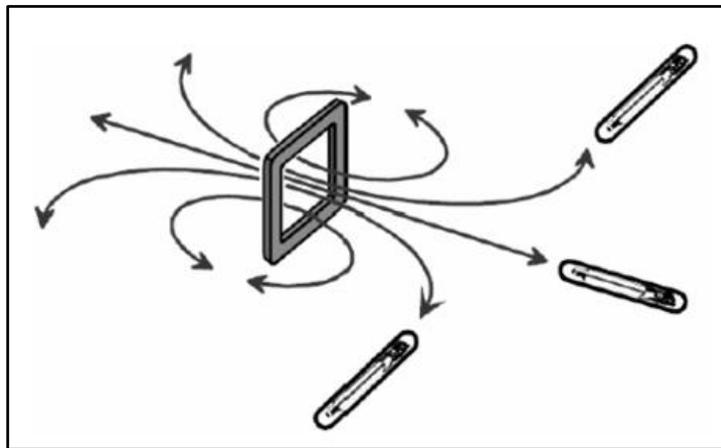


Figura 1.3. Propagación del campo magnético en una antena RFID (Juan, 2010).

#### Patrones de radiación

Los patrones de radiación de una antena para la tecnología RFID son de 3 tipos como se muestra en la figura 1.4:

- Isotrópico: es el haz de referencia que se toma como modelo.
- Omnidireccional: es el haz que tiene una antena RFID clásica.
- Directivo: son el haz de las antenas RFID que son utilizadas en un portal.



Figura 1.4. Patrones de radiación en una antena RFID (Intermec, 2010).

### Polarización

La polarización de una onda plana es simplemente la dirección de su vector de campo eléctrico. Si esto no tiene variación la polarización se describe como lineal. La polarización es circular si la intensidad del campo es igual en todos los ángulos de polarización y es elíptica si la intensidad del campo varía conforme cambia la polarización (Blake, 2002) como se muestra en la figura 1.5.

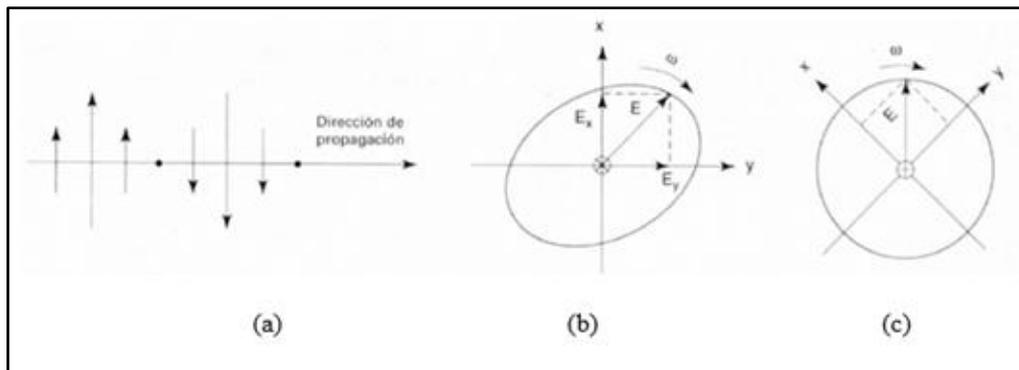


Figura 1.5. Polarización de la antena (a) polarización lineal, (b) polarización elíptica, (c) polarización circular (Wayne, 2003).

## 1.4 Funcionamiento principal de sistemas RFID

Un sistema RFID es la tecnología inalámbrica que nos permite, básicamente, la comunicación entre un lector y una etiqueta (transponder: emisor-transmisor). Esta tecnología es un método automático de identificación. Basado en el almacenamiento y recuperación remota de datos (Maria, 2005) (cooney, 2006).



Un sistema RFID consta de (González, 2008):

- Circuito RFID. está compuesto por un chip y una antena la cual permite el intercambio de información que contiene el chip por medio de una antena interna que varía según la aplicación a realizar.
- Lector RFID. está formado por una antena y un decodificador. El lector envía señales periódicamente para la localización de un circuito dentro del rango de lectura, cuando esta señal es captada, la información pasa por el proceso para la obtención de datos. Estos lectores están diseñados para soportar ambientes de altas y bajas temperaturas y de humedad. Así como en ambientes de trabajo donde existen vibraciones (empresas de manufactura o producción y trabajo pesado).
- Procesamiento de datos. se obtiene y procesan los datos que son almacenados en la etiqueta, el sistema está diseñado para trabajar en diversos lenguajes de programaciones tales como: .NET, Java y XML.

El funcionamiento del sistema mostrado en la figura 1.6, es de la siguiente manera: el lector envía una serie de ondas de radiofrecuencia a la etiqueta, que son captadas por la micro antena de éste. Dichas ondas activan el microchip, el cual, a través de la micro antena y mediante ondas de radiofrecuencia, transmite al lector la información que tengan en su memoria. Finalmente, el lector recibe la información que tiene la etiqueta y lo envía a una base de datos en la que previamente se han registrado las características del producto o puede procesarlo según convenga a cada aplicación (Jary-Pascal Curty, 2007).

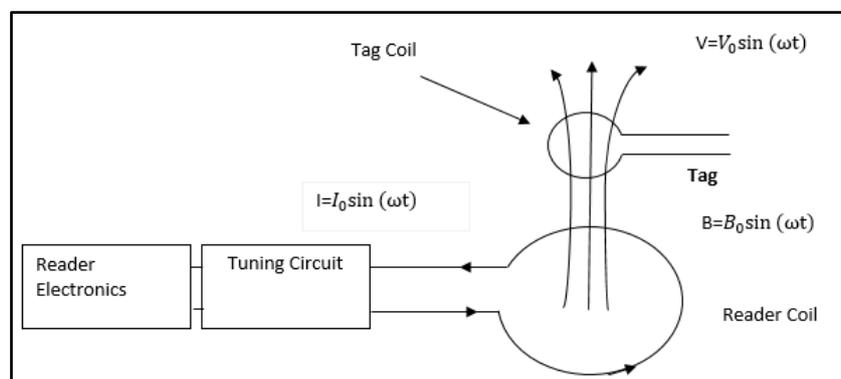


Figura 1.6. Esquema de un sistema RFID (Youbok Lee).



La onda electromagnética de radiofrecuencia que produce una antena transporta una energía a través del campo eléctrico y magnético que son inseparables por ello se denomina campo electromagnético. Para la realización de la comunicación electromagnética que rodea el espacio de una antena existen dos zonas importantes donde el emisor es rodeado de energía de RF las cuales se mencionan a continuación (Miguel Ángel Solano Vérez):

- Near-Field, o campo próximo en español, es la zona próxima a la antena, la relación que existe entre el campo eléctrico y magnético no es constante y la energía asociada a los campos en esta zona no se corresponde con energía propagándose por el medio sino más bien energía almacenada por el campo de forma similar a los campos estáticos o de baja frecuencia. Por tal motivo, no existe radiación de energía y los campos se llaman de inducción y a esta zona se llama zona de inducción. La inducción se pierde rápidamente en potencias altas o al cuadrado de la distancia cada vez que se va a alejando de la fuente. Sin embargo el campo magnético y eléctrico son independientes entre sí, y existen por separado.
- Far-Field, o campo lejano en español, es una zona alejada de la antena los campos que se ejercen son TEM (transversales electromagnéticas). En esta zona los campos propagan o radian energía y por ello se llaman campos de radiación y a la zona se llama zona de radiación.

### **Acoplamiento**

La tecnología RFID se basa en comunicaciones bidireccionales existentes entre un lector y una etiqueta, por medio de la propagación de ondas electromagnéticas de radio frecuencia. La transmisión de información varía dependiendo de la frecuencia de operación, los sistemas RFID se basan en sistemas de acoplamiento dependiendo de esta afecta directamente el rango de lectura entre las etiquetas y los lectores. Los acoplamientos utilizados en la tecnología RFID son los siguientes (Lahiri, 2005).

- Acoplamiento electromagnético: se utiliza para los sistemas RFID de ultra alta frecuencia (UHF). Este acoplamiento consiste en reflejar la señal para enviarla al origen. Dado que el lector y la etiqueta utilizan la misma frecuencia para comunicarse, dependen del sistema Half-duplex, el cual se basa en envío de



información bidireccional no simultáneo. Sin embargo el lector emite energía todo el tiempo a la etiqueta hasta que esta le envíe respuesta.

- Acoplamiento inductivo: el lector hace un acoplamiento inductivo para proporcionar la energía a las etiquetas mediante antenas en forma de bobina para generar campo magnético.
- Acoplamiento magnético: se produce cuando la antena del lector (bobina) es enrollada en una pieza de ferrita con los extremos al aire.
- Acoplamiento capacitivo o eléctrico: se basa en otro tipo de acoplamiento cerrado, como el magnético.

Los diferentes métodos de propagación que son usados en las diferentes frecuencias son, de tal modo que el acoplamiento inductivo haga funcionar a bajas frecuencias y sistemas de propagación de ondas a frecuencias altas (González, 2008).

#### Acoplamiento inductivo.

Se basa en el principio similar al de los transformadores, la frecuencia de campo magnético creado por la antena es la energía que aprovecha el transponder para llevar a cabo la comunicación, ya que el campo se encuentra cerca de la antena del lector, el cual permite la comunicación a distancias cercanas al diámetro de la antena, por tal motivo si se requiere mayor distancia se necesitara elevar la potencia de la antena. La bobina del lector genera un campo electromagnético, el cual atraviesa la sección de la antena del transponder y puede ser interpretado como campo magnético simple alternante con respecto a la distancia que existe entre el transponder y el lector véase figura 1.7.

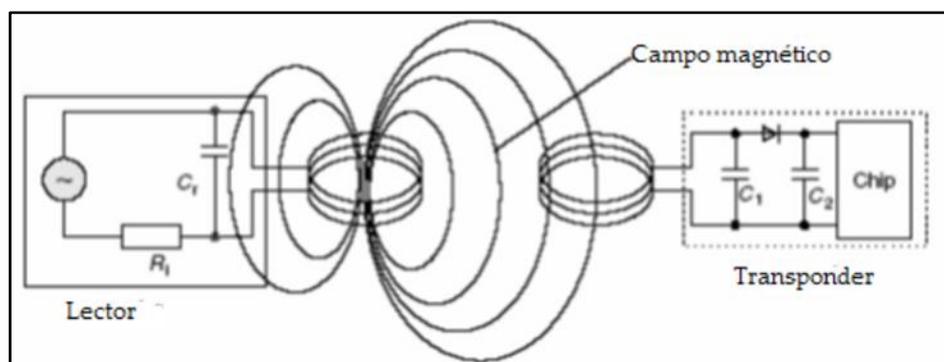


Figura 1.7. Acoplamiento inductivo entre el lector y el transponder (Bettezzati, 2005).



Una parte del campo magnético que es emitido penetra la bobina del transponder, se genera una tensión en la antena por inducción, generando un voltaje el cual se rectifica y sirve como alimentación del microchip del transponder el cual contiene la información (Bettezzati, 2005).

Como se muestra en la figura 1.7, un capacitor es conectado en paralelo con la antena el cual forma un circuito resonante en paralelo con la misma frecuencia de transmisión del lector. Esto genera intensos campos, necesarios para la comunicación entre el transponder y el lector. Al formarse un circuito resonante en paralelo la antena del transponder y el capacitor trabajan a la misma frecuencia del lector (Bettezzati, 2005).

La eficiencia de la energía que es transmitida entre las antenas del lector y del transponder es proporcional a la frecuencia de operación, la relación entre el número de espiras que tienen las bobinas (en los transformadores conocido por el factor  $n$ ), el área encapsulada por la antena del transponder, el ángulo que forman las bobinas una en relación a la otra y la distancia entre las dos bobinas. Cuando la frecuencia se incrementa, la inductancia requerida en el transponder y el número de espiras decrece (Bettezzati, 2005).

Como ejemplo, podemos decir que a una frecuencia de 135 KHz, el valor del factor  $n$  oscila entre 100 y 1000, y para una frecuencia de 13,56 MHz el valor del factor  $n=3-10$ . Esto es debido a que el voltaje inducido en el transponder es todavía proporcional a la frecuencia de resonancia, en cambio el número de espiras de la bobina apenas afecta a la eficiencia de la energía transmitida a altas frecuencias (Bettezzati, 2005).

### **Transferencia de datos entre transponder y lector**

En el acoplamiento inductivo de la tecnología RFID se utilizan 3 tipos de modulación.

1. Load modulation.
2. Load modulation con subportadora.
3. Subarmónicos.

### **Load modulation**

El fundamento principal con el cual opera es similar al funcionamiento de un transformador, siendo la bobina primaria la del lector y la secundaria la del transponder. Esto se puede lograr si la distancia entre ambos es corta, por lo que el transponder y el



lector deben estar próximos. Si un transponder en resonancia se encuentra dentro del campo magnético de un lector, este se energiza del campo magnético. Conectando y desconectando la resistencia de carga presente en la antenna del transponder se consigue variar el valor de  $Z_T$  el cuál es la impedancia de la antenna, con lo cual el voltaje existente en la antenna del lector varía. Esto tiene cambios en la modulación de amplitud del voltaje del lector (Weis, 2003).

### Load modulation con subportadora

El acoplamiento que se realiza entre el lector y el transponder es débil, las oscilaciones que se presentan en la tensión de la antenna del lector, la información es de varios ordenes inferior a la salida del lector. Para la detección de este tipo de oscilación se requiere de un circuito complicado. Para la solución de este problema es necesario colocar resistencias de carga en el transponder que se conecte y desconecte a una frecuencia elevada, un método para darle solución es la implementación de un transistor FET en el transponder como se muestra en la figura 1.8 (Bettezzati, 2005).

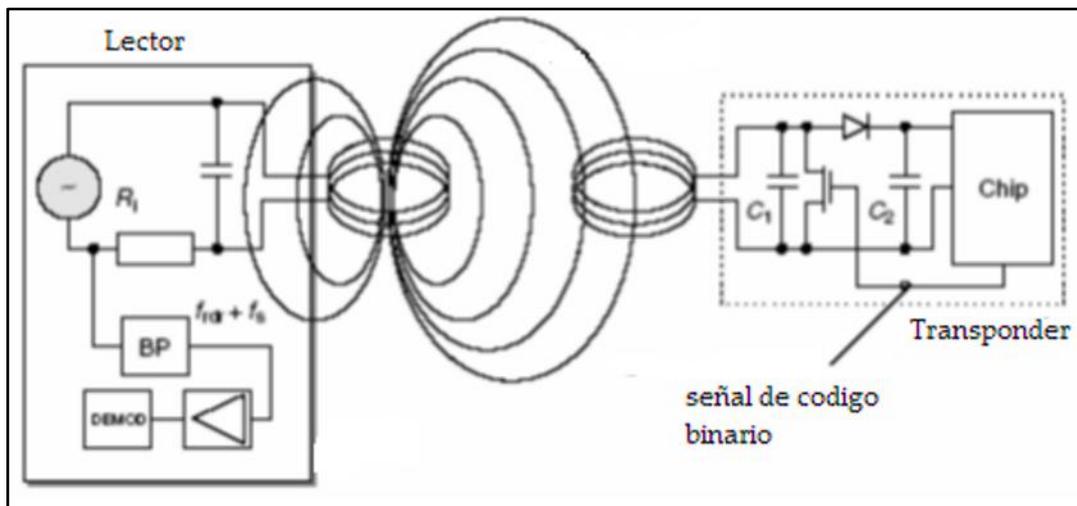


Figura 1.8. Generación de un *Load Modulation* (Bettezzati, 2005).

Para la detección de estas ondas oscilatorias se requiere de otro tipo de circuitería, para darle solución se usan las bandas de corte a la modulación creada. Es necesario incorporar una nueva resistencia de carga en el transponder que se conecte y desconecte a una frecuencia elevada  $f_s$  entonces dos líneas espectrales son creadas a una distancia



de la frecuencia de resonancia entre el lector y transponder. Uno de los métodos utilizados es el empleo de un transistor FET en el transponder como se ve en la figura 1.9 (Bettezzati, 2005).

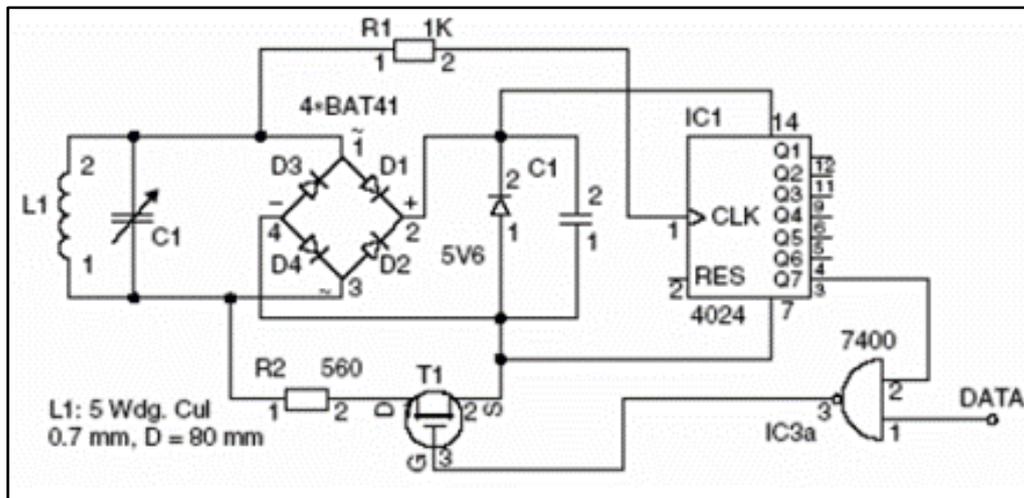


Figura 1.9. Generador de modulación de carga con subportadora en sistema de acoplamiento inductivo (Bettezzati, 2005).

En las frecuencias de corte, es más sencilla la detección de las variaciones de tensión.

La información contenida puede ser modulada en ASK, FSK o PSK.

Esto significa una modulación de amplitud en la subportadora. Se utiliza un filtro pasa banda para rechazar una de las dos subportadoras. La amplitud de banda que requieren estos filtros se usan en el rango de frecuencias de operación de 6.78 MHz, 13.56 MHz y 125 MHz (Bettezzati, 2005) véase figura 1.10.

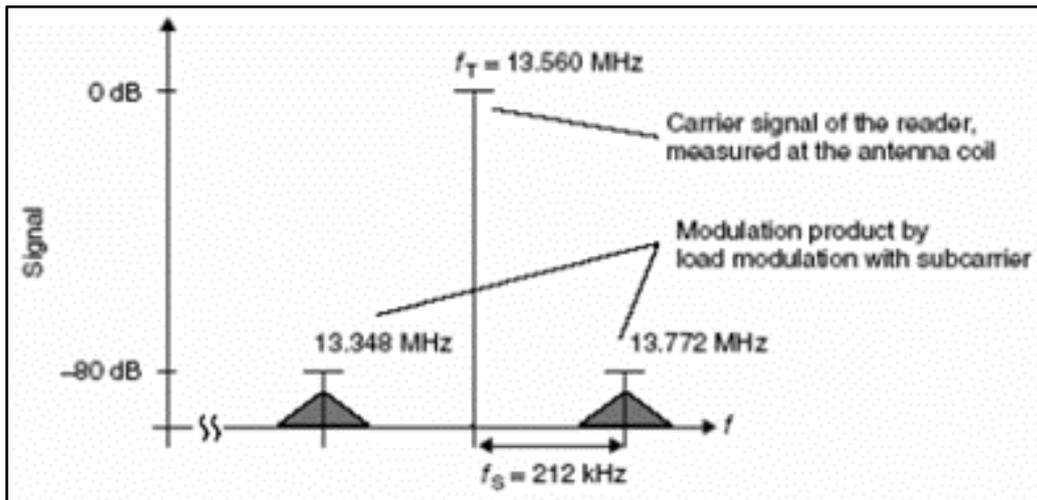


Figura 1.10. Bandas de corte creadas por load modulation (Bettezzati, 2005).

### Subarmónicos

Es la utilización de subarmónicos de una frecuencia  $f_A$ , es decir,  $f_1=f_A / 2$ ,  $f_2=f_A / 3$ , etc. Se suele utilizar el primer subarmónico, la mitad de la frecuencia en la que transmite el lector. La señal después del divisor necesita ser modulada por el flujo de datos y enviada para el transponder ver figura 1.11. Esta será la frecuencia a la que responda el transponder. El transponder necesitará un divisor binario de frecuencia para realizar dicha operación. La frecuencia de operación más popular para los sistemas subarmónicos es de 128 kHz. Por lo que la frecuencia de respuesta del transponder es de 64 kHz.

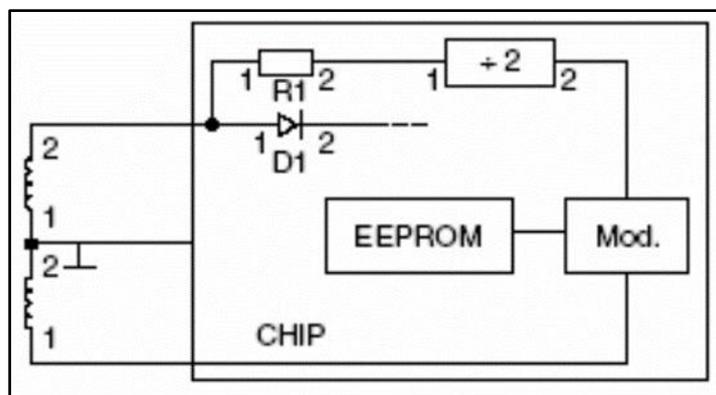


Figura 1.11. Diseño de un transponder utilizando subarmónicos (Bettezzati, 2005).



### Acoplamiento backscatter

Este tipo de información transmitida es de largo alcance superiores a un metro de distancia. Para su funcionamiento se aplica el uso de ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de 868 MHz y 2.5 GHz en el espectro de frecuencias UHF y microondas respectivamente. Al utilizarse frecuencias altas la longitud de onda es pequeña y por tal motivo se pueden hacer antenas de tamaño pequeño y de gran eficiencia, logrando así una distancia de 3 metros para transponder pasivos y de 15 metros para transponder activos (Bhuptani Manish, 2005).

El transponder hace la modulación de la información que recibe desde el lector, haciendo variaciones de la impedancia de la antenna, esto se logra variando el valor de la resistencia de carga (Bhuptani Manish, 2005).

El lector tiene un acoplador direccional para la separación de la señal transmitida y recibida. La impedancia del transponder es modulada por el transistor FET del chip como se muestra en la figura 1.12 (Bhuptani Manish, 2005).

La diferencia que existe entre los acoplamientos inductivos y backscatter es el origen de la energía para la realización de la comunicación (Bhuptani Manish, 2005).

Acoplamiento inductivo: utilizan la energía que una antenna puede llegar a crear a su alrededor (Bhuptani Manish, 2005).

Acoplamiento backscatter: utiliza ondas electromagnéticas consiguiendo así un rango de lectura mayor (Bhuptani Manish, 2005).

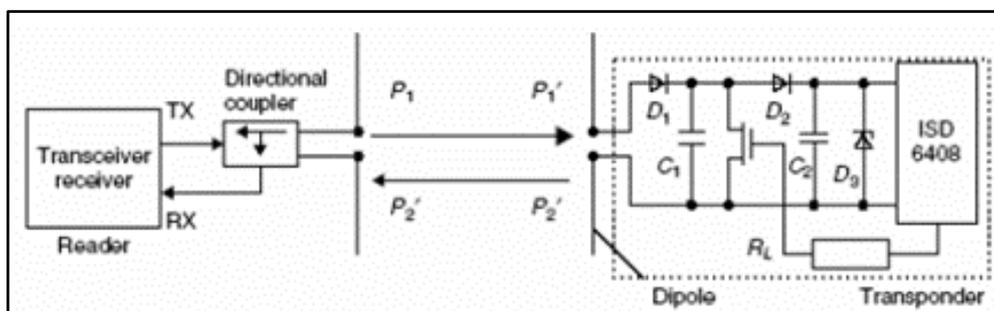


Figura 1.12. Esquema de funcionamiento de un sistema de acoplamiento backscatter (Bhuptani Manish, 2005).



## 1.5 Aplicaciones

Hay diversos sectores en donde la utilización de los sistemas RFID va en aumento pero los principales son estos (Ego México, s.f.) (Finkenzeller).

Tabla 1.2 Aplicaciones de los sistemas RFID.

<b>Logística e industria</b>	Identificación de contenedores
	Inventario en tiempo real
	Lectura en cinta de transporte
	Localización de mercancía
	Monitoreo y censo de temperatura
	Control de productividad
	Seguimiento de vehículos y maquinaria en la industria
	Etiquetado de prendas textiles
<b>Seguridad y control</b>	Control de acceso por proximidad, tanto de vehículos como objetos
	Control de productividad
	Localización en interiores y exteriores
	Localización de tiempo real de los objetos en determinadas áreas
	Control de acceso para personal
	Control antirrobo en determinadas áreas
<b>Comercios y servicios</b>	Inventario tiempo real
	Autenticación de productos
	Seguridad anti robo
	Gestión de alquileres
<b>Hospitales y residencias</b>	Llamada a un grupo medico
	Localización de pacientes y residentes
	Control de lavandería y almacén en un hospital
	Localización de equipo medico



<b>Cultura</b>	Información de algún libro dentro de una biblioteca
	Antirrobo de obras de arte
	Control de entrada y salida así como de inventario de algún ejemplar
	Localizador de lectores dentro de un área específica.

## 1.6 Estándares

La organización llamada Internacional Standard Organization (ISO) dirige los estándares mundiales. Los miembros de ISO son organizaciones de estandarización nacionales como la ANSI, BSI y DIN que son diferentes tipos de estándares en diferentes países. La international Electromechanical Comision (IEC), se interés en el campo de la electrónica en muchos casos se han combinado para poder estar dentro de la comisión a estas se les refiere como ISO/IEC.

### *EPC Global.*

La Electronic Product Code o EPC Global, es la organización internacional de RFID, establece los estándares para el uso del producto electrónico. Es una organización de riesgo compartido entre EAN (European Article Number) y UCC (Uniform Code Council), organizaciones de estados unidos y Europa se encarga de la administración global de los estándares (EPC Global Inc, 2009).

Los estándares EPC dividen a las etiquetas según su funcionalidad en seis tipos.

- Clase 0: etiquetas pasivas con 96 bits de solo lectura.
- Clase 1: etiqueta pasiva de una escritura y múltiples lecturas.
  - Versión 1: 96 bits, EPC data de 64 bits y 32 bits reservados.
  - Versión 2: nueva “GEN 2”: 256 bits, 96bit EPC data, 32 bits reservados, 128 bits de memoria. Encriptación, kill bits. Se pueden re-escribir múltiples veces. Compatible con clases estándar anteriores. Algoritmo anticolidión.



- Clase 2: Pasivo de lectura/escritura múltiple.
- Clase 3: Semi-Activo/Semi-Pasivo de lectura/escritura múltiple.
- Clase 4: Activo de lectura/escritura múltiple. Comunicación entre tags clase 4.
- Clase 5: lectores.

Por su parte, ISO ha desarrollado estándares de RFID para la identificación automática y la gestión de objetos. Existen varios estándares relacionados, como ISO 10536 , ISO 14443 e ISO 15693, pero la serie de estándares estrictamente relacionada con las RFID y las frecuencias empleadas en dichos sistemas es la serie 18000- (interfaz aire) que se muestra en la tabla siguiente (ISO, 2015):

Tabla 1.3. Estándares ISO para RFID (ISO, 2015).

ISO	Descripción
18000-1	Parámetros de interfaz aire generalmente aceptados.
18000-2	Parámetros de interfaz aire para comunicaciones inferiores a 135 KHz.
18000-3	Parámetros de interfaz aire para comunicaciones de 13.56 MHz.
18000-4	Parámetros de interfaz aire para comunicaciones de 2.45 GHz.
18000-5	Parámetros de interfaz aire para comunicaciones de 5.8 GHz.
18000-6	Parámetros de interfaz aire para comunicaciones de 860 hasta 960 MHz.
18000-7	Parámetros de interfaz aire para comunicaciones de 433 MHz.



## Capítulo 2. Principios físicos para el desarrollo de la antena RFID

Las etiquetas pasivas de RFID utilizan una bobina de antena inducida para el funcionamiento. Esta inducción de CA es rectificadora para la fuente de alimentación del dispositivo. Como la alimentación de CC llega a estar en un cierto nivel, el dispositivo comienza a funcionar. Al proporcionar una señal de alimentación de RF, el lector puede comunicarse con la ubicación remota del dispositivo del cual no tiene una fuente de alimentación, como una batería. Ya que la alimentación y la comunicación entre el lector y la etiqueta se logra por medio de bobinas de antena, es importante que el dispositivo este equipado con un circuito de antena adecuado para obtener éxito.

Una señal de RF puede ser radiada efectivamente si la línea dimensional de la antena es comparable con la longitud de onda de la frecuencia de operación. Sin embargo, la longitud de onda a 13.56 MHz es 22.12 metros. Por lo tanto es difícil formar una antena de verdad para la mayoría de las aplicaciones de RFID (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

Una corriente que fluye en la bobina radia un campo magnético de campo cercano que se cae con  $r^{-3}$ . Este tipo de antena se denomina antena dipolo magnético.

Para aplicaciones de etiquetas pasivas de 13.56 MHz, unos pocos micros henrio de inductancia y unos pocos cientos de pico Faradios de condensador resonante son los que se utilizan normalmente. El voltaje transferido entre las bobinas del lector y la etiqueta se logra a través de un acoplamiento inductivo entre las dos bobinas como un transformador típico, donde un voltaje de transferencia en la bobina primaria a la secundaria, el voltaje en el lector de la bobina de la antena se transfiere a la bobina de la etiqueta, y viceversa (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

### 2.1 Campo magnético

Alrededor de un imán permanente existe un campo magnético, el cual puede ser representado por líneas de flujo magnético parecidas a las líneas del flujo eléctrico. Las líneas de flujo magnético no tienen puntos de origen o terminación como las líneas de flujo eléctrico, si no que existen en lazos continuos como se muestra en la figura 2.1. (Boylestad, 2011).

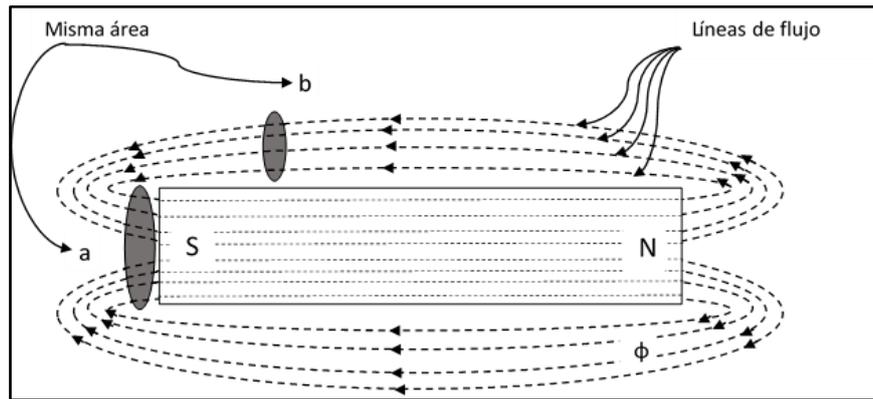


Figura 2.1. Distribución campo magnético en un imán permanente (Boylestad, 2011).

Las líneas de flujo magnético son radiadas del polo norte al polo sur, y regresan al polo norte a través de la barrera metálica. La separación es igual entre las líneas de flujo dentro del núcleo y la distribución simétrica fuera del material magnético es diferente. La línea de flujo magnético continua se esforzará por ocupar un área lo más pequeña posible. La fuerza de un campo magnético en una región particular está directamente relacionada con la densidad de las líneas de flujo en esta región como se muestra en la figura 2.2. (Boylestad, 2011).

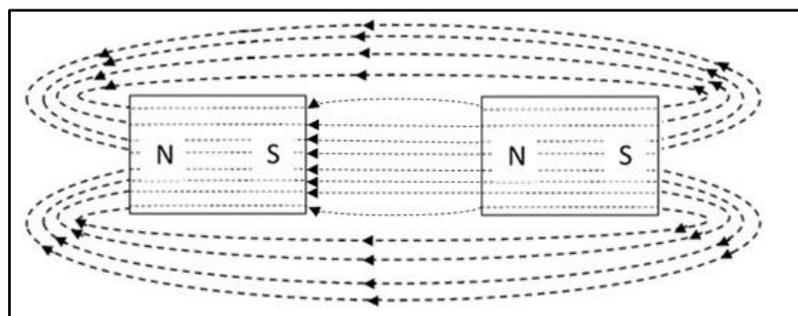


Figura 2.2. distribución del flujo de dos polos opuestos norte-sur (Boylestad, 2011).

El flujo magnético se mide en webers (Wb). El símbolo que se le aplica es la letra griega  $\Phi$  mayúsculas. El número de líneas de flujo por área unitaria, llamado densidad de flujo, se indica con la letra  $B$  mayúsculas y se mide en teslas (T) (Boylestad, 2011).



En forma de ecuación,

$$= \frac{\phi}{A}$$

$$B = \text{Wb}/m^2 = \text{teslas } (T)$$

$$\Phi = \text{webers } (\text{Wb})$$

$$A = m^2$$

Donde  $\Phi$  es la cantidad de líneas de flujo magnético que pasa por el área A en la figura 2.3. La densidad de flujo en el punto a de la figura 2.1. Es dos veces la del punto b porque por la misma área pasa el doble de líneas de flujo (Boylestad, 2011).

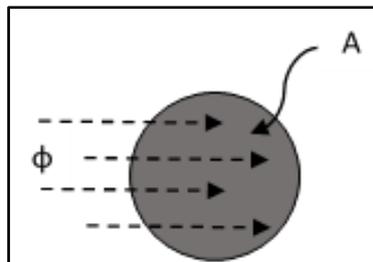


Figura 2.3. Densidad de flujo B (Boylestad, 2011).

En la ecuación 2.1, la equivalencia está dada por:

$$1 \text{ tesla} = 1T = 1 \frac{\text{Wb}}{m^2}$$



Si 1 weber de flujo magnético pasa por un área de 1 metro cuadrado, la densidad del flujo es de 1 tesla (Boylestad, 2011).

En el sistema CGS, el flujo magnético se mide en maxwells y la densidad de flujo en gauss. En el sistema inglés, el flujo magnético se mide en líneas y la densidad de flujo en líneas por pulgada cuadrada (Boylestad, 2011).

La densidad de flujo de un electroimán está relacionada con el número de vueltas de la bobina, y la corriente a través esta. El producto de las dos cantidades es llamado fuerza magneto motriz, se mide en ampere-vueltas (At) como se define a continuación (Boylestad, 2011).

$$= NI$$

Si se incrementa el número de vueltas alrededor del núcleo y/o la corriente a través de la bobina, la fuerza del campo magnético también se incrementa. En muchas maneras, la fuerza magneto motriz en circuitos magnéticos es casi igual al voltaje aplicado en un circuito eléctrico (Boylestad, 2011).

En el sistema CGS, la fuerza magneto motriz se mide en gilberts, en tanto que en el sistema inglés se mide en ampere-vueltas (Boylestad, 2011).

Otro factor que afecta la fuerza del campo magnético es el tipo de núcleo utilizado. Se dice que los materiales en los cuales es fácil establecer las líneas de flujo magnético son magnéticos y que tienen una alta permeabilidad. Asimismo, la permeabilidad (representada por la letra griega mu,  $\mu$ ) de un material mide la facilidad con que pueden establecerse las líneas de flujo magnético en el material (Boylestad, 2011).

Así como existe un valor específico para la permitividad del aire, también existe un número específico asociado con la permeabilidad del aire (Boylestad, 2011).



$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A}} \cdot \text{m} \quad (2.3)$$

### Constantes Eléctrica y Magnética

Los campos eléctrico y magnético hacen uso de tres constantes en las ecuaciones que lo describen así como su propagación. Una de ellas es la velocidad de la luz  $c$ , la permitividad eléctrica del vacío  $\epsilon_0$  y la permeabilidad magnética del vacío,  $\mu_0$  son las otras dos constantes en el uso de la ecuación. La permeabilidad magnética del vacío se dice que tiene el siguiente valor exacto (Nave, 2001).

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$$

La constante magnética  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$  se le llama permeabilidad del espacio.

Establecida la permeabilidad magnética, la permitividad eléctrica tiene el siguiente valor determinado en la formula (Nave, 2001).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

En donde la velocidad de la luz tiene el siguiente valor (Nave, 2001):

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (exacto)} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$



Esto genera un valor de la permitividad del vacío de (Nave, 2001):

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \approx 8.85 \times 10^{-12} F/m$$

Que en la práctica esta es usada en la forma (Nave, 2001):

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.987552 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} = \text{constante de coulomb}$$

Esta ecuación contiene las unidades de F para Faraday la unidad de capacidad, C para coulombio la unidad de carga eléctrica (Nave, 2001).

### **Velocidad de la Luz**

La velocidad de la luz es un medio, la cual está relacionada con las propiedades eléctricas y magnéticas del medio, y la velocidad de la luz en el vacío puede ser representada de la siguiente forma.

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, c (Nave, 2001).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$\mu_0$  = permeabilidad magnetica

$\epsilon_0$  = permeabilidad magnetica

### **Campo magnético de un bucle de corriente**

La corriente eléctrica que circula en un bucle circular, crea un campo magnético que es mayor en el centro del bucle que en el exterior del mismo. El acoplamiento de múltiples bucles que se lleva a cabo en lo que llamamos solenoide, concentra aún más el campo magnético (Nave, 2001) véase figura 2.4.

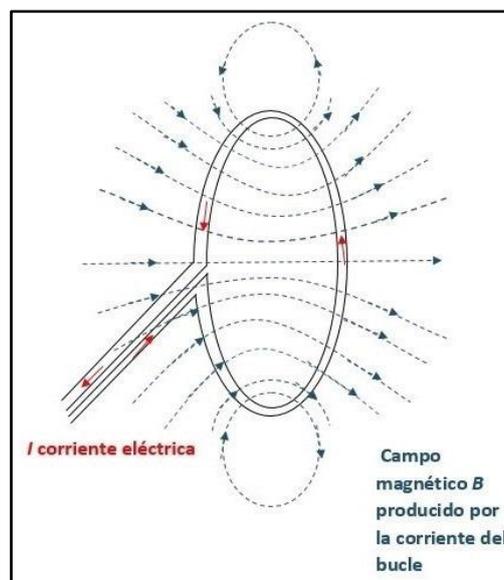


Figura 2.4. Campo magnético de un bucle de corriente (Nave, 2001).

### **Campo en el Centro de un Bucle de Corriente**

La ecuación que define el campo magnético de un elemento en la corriente de la ley Biot-Savart tiende a ser (Nave, 2001) véase figura 2.5.



$$dB = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \vec{r}}{4\pi R^2} = \frac{\mu_0 I dL \sin \Theta}{4\pi R^2} \quad (2.4)$$

En este caso en especial se simplifica bastante ya que el ángulo es igual a 90° para todos los puntos a lo largo del trayecto, y la distancia al punto es constante. La integral se puede definir como (Nave, 2001):

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \oint dL = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (2.5)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$$

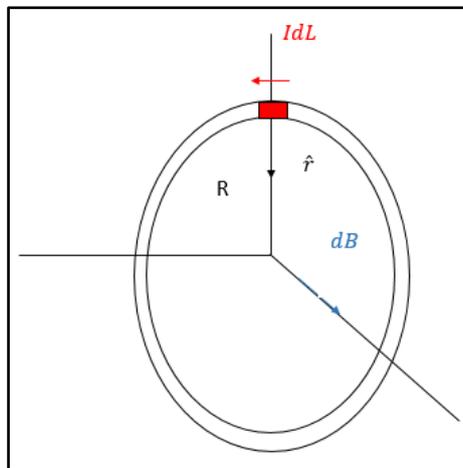


Figura 2.5. Campo magnético en el centro de un bucle de corriente (Nave, 2001).

En este caso en particular la simetría es tal que las contribuciones es de todos los elementos de corriente actuales alrededor de la circunferencia se añaden directamente en el centro (Nave, 2001).



La corriente que se utiliza en la educación 2.5 es la corriente total, de modo que para una bobina de N vueltas, la corriente que se usa es Ni donde i es la corriente suministrada a la bobina (Nave, 2001).

El campo magnético que es generado por la tierra misma en su superficie es de alrededor de 0.5 Gauss (Nave, 2001).

### **Campo magnético en el eje del bucle de corriente**

La integración de la componente z en la aplicación de la ley Biot-Savart sobre la línea central de un bucle de corriente es aplicada (Nave, 2001) véase figura 2.6.

$$dB_z = \frac{\mu_0 IdL}{4\pi} \frac{R}{(Z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.6)$$

La simetría llega a ser tal que, todos los términos definidos en la ecuación 2.6 son constantes, excepto el elemento de la distancia dL, que cuando se llega a integrar, da exactamente la circunferencia del círculo. Entonces, el campo magnético está determinado por (Nave, 2001):

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(Z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.7)$$

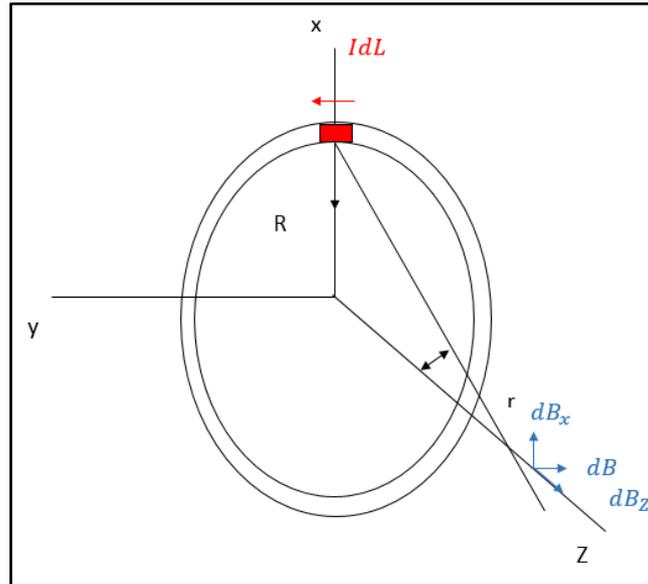


Figura 2.6. Campo magnético en el eje del bucle de corriente (Nave, 2001).

El campo definido como  $dB_x$  gira alrededor a medida que avanza el bucle, y por la simetría del campo neto cero para el bucle, el campo en este punto es la dirección de z, a lo largo de la línea central del bucle (Nave, 2001).

**Geometría del campo en el eje del bucle de corriente**

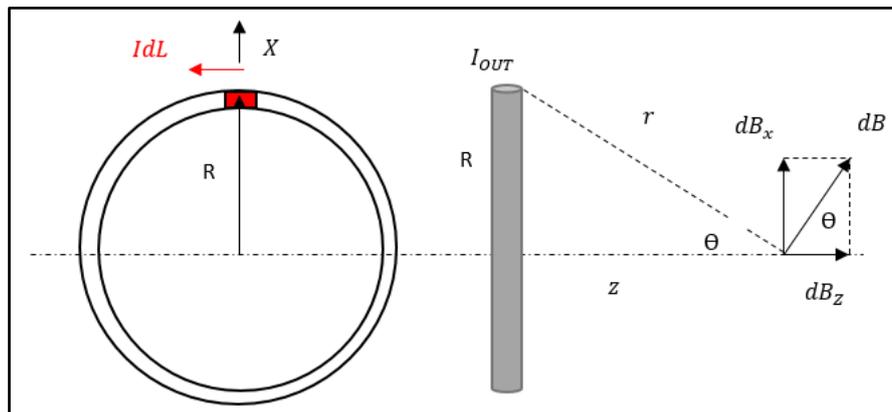


Figura 2.7. Geometría del campo en el eje del bucle de corriente (Nave, 2001).

$$dB = \frac{\mu_0 IdL}{4\mu r^2} \tag{2.8}$$



$$r^2 = Z^2 + R^2$$

Sustituyendo:

$$dB_z = dB \sin \Theta$$

Y

$$\sin \Theta = \frac{R}{\sqrt{Z^2 + R^2}}$$

Obtenemos:

$$dB_z = \frac{\mu_0 IdL}{4\pi} \frac{R}{(Z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.9)$$

## 2.2 Inductancia

En el envío de una corriente a través de una bobina de alambre, con o sin núcleo, genera un campo magnético en y alrededor de la unidad. Este componente (vea la figura 2.8), se llama inductor (bobina). Su nivel de inductancia determina la fuerza del campo magnético alrededor de la bobina debido a una corriente aplicada. Cuanto más alto sea el nivel de inductancia, más grande será la fuerza del campo magnético. La inductancia se mide en henries (H), por el físico estadounidense Joseph Henry (Boylestad, 2011).

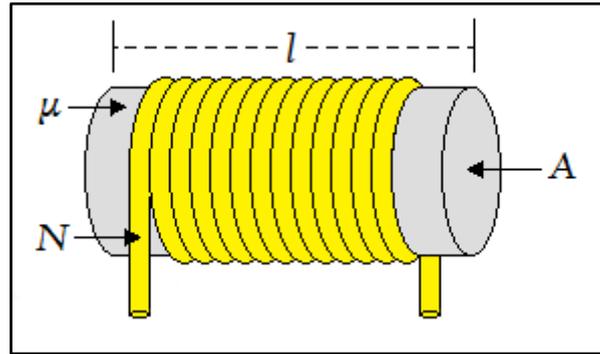


Figura 2.8. Definición de los parámetros de la ecuación 2.10 (Boylestad, 2011).

### Construcción de un inductor

El nivel de inductancia tiene que depender del área interna de la bobina, de la longitud de la unidad y de la permeabilidad del material del núcleo. También es sensible al número de vueltas de alambre en la bobina, como lo dicta la siguiente ecuación y se define en la figura 2.8 (Boylestad, 2011):

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2.10)$$

$\mu$  = permeabilidad (Wb/A · m)

$N$  = número de vueltas (t)

$A = m^2$

$l = m$

$L = \text{henries (H)}$



### Construcción de un inductor rectangular de n vueltas

Calculo de una inductancia rectangular de n vueltas esa dada por la siguiente ecuación véase figura 2.9, 2.10 (Youbok Lee):

$$L = \frac{0.0276 (CN)^2}{1.908C + 9b + 10h} \quad (\mu H) \quad (2.11)$$

Donde:

N= número de vueltas

C= x + y + 2h

x= ancho de la bobina

y= longitud de la bobina

b= ancho de la sección transversal

h= altura de la sección transversal

nota: todas las medidas son en cm.

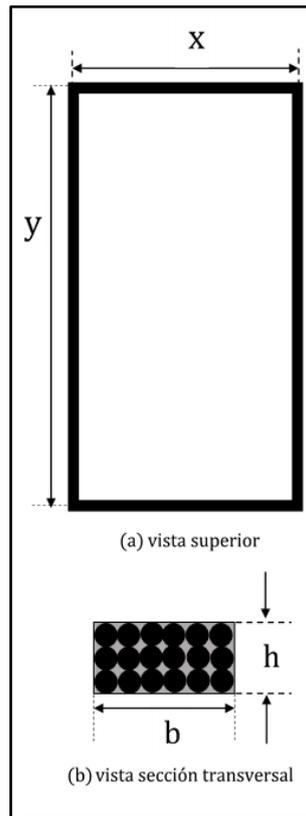


Figura 2.9. Bobina rectangular con  $n$  vueltas (Youbok Lee).

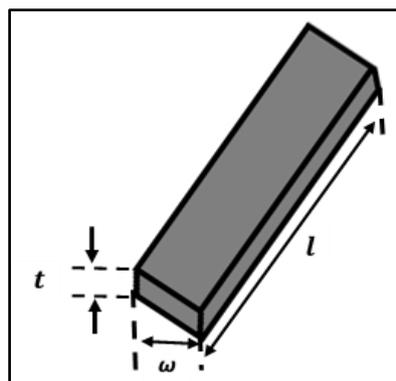


Figura 2.10. Una línea recta de un conductor (Youbok Lee).



$$L = 0.002l \left\{ \ln \left( \frac{2t}{w+t} \right) + 0.50049 + \frac{w+t}{3l} \right\} (\mu H) \quad (2.12)$$

$w$  = ancho en cm

$t$  = espesor en cm

$l$  = longitud del conductor en cm

### Inductancia en una bobina plana

Inductancia en una bobina plana de  $n$  vueltas está dada por véase figura 2.11 (Youbok Lee):

$$L = 0.0467aN^2 \left\{ \log_{10} \left( 2 \frac{a^2}{t+w} \right) - \log_{10}(2.414a) \right\} \\ + 0.02032aN^2 \left\{ 0.914 \right. \\ \left. + \left[ \frac{0.2235}{a} (t+w) \right] \right\} \quad (2.13)$$

Donde:

$L$  = en  $\mu H$

$a$  = largo del lado pulgadas

$t$  = espesor en pulgadas

$w$  = ancho en pulgadas

$N$  = total de número de vueltas

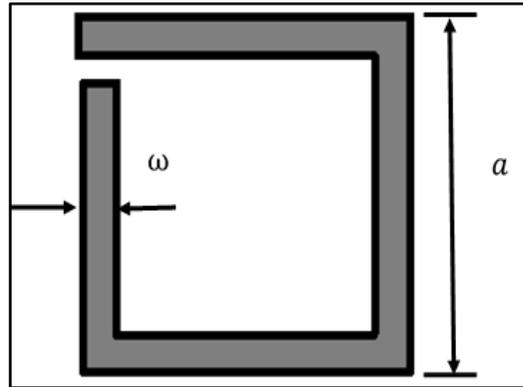


Figura 2.11. Bobina de un cable recto vista de la sección transversal (Youbok Lee).

### 2.3 Ley de FARADAY

La ley de Faraday establece que un campo magnético variable en el tiempo a través de una superficie que tiene una trayectoria cerrada una tensión alrededor del bucle (Nave, 2001) véase figura 2.12.

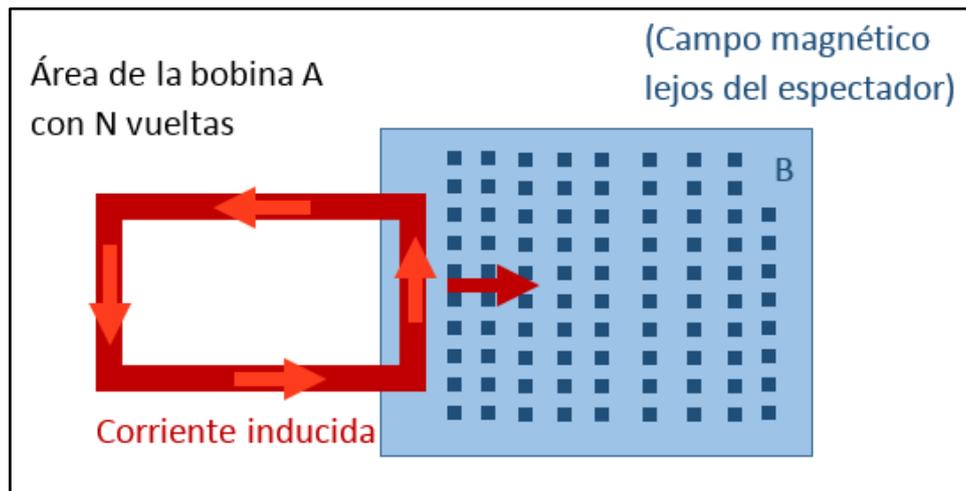


Figura 2.12. Voltaje inducido a través de una superficie (Nave, 2001).

Cuando existe una interacción entre la etiqueta y el lector en el tiempo de variación del campo magnético  $B$  que es producido por la antena del lector de bucle este hace inducir un voltaje (llamado fuerza magneto motriz o simplemente EMF por sus siglas en inglés) en la bobina de la antena de bucle cerrada (Nave, 2001).

## 2.4 Voltaje inducido $v_L$

La ley de la inducción electromagnética de Faraday, nos permite establecer voltajes de ca y cd con un generador. Si movemos un conductor a través de un campo magnético haciendo que corte las líneas de flujo magnético como se muestra en la figura 2.13, esto induce un voltaje que fluye por el conductor y que puede medirse. Cuanto más rápido lo movemos a través del flujo magnético mayor será el voltaje inducido (Boylestad, 2011).

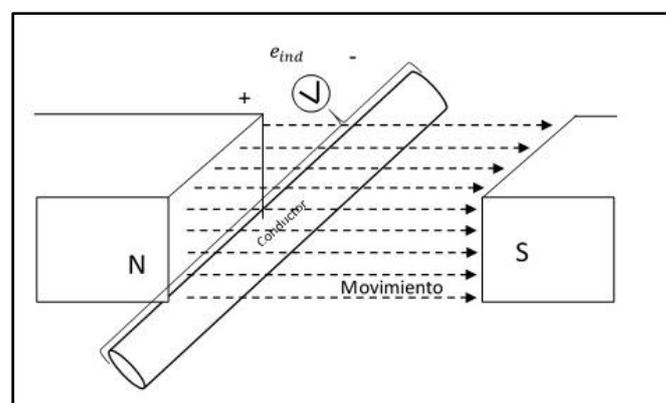




Figura 2.13. Generación de un voltaje por el movimiento de un conductor a través de un campo magnético (Boylestad, 2011).

Si se llega a manipular una bobina de  $N$  vueltas a través de un campo magnético como se muestra en la figura 2.14, se inducirá un voltaje que fluirá por la bobina según la ley de Faraday. Cuanto es mayor el número de vueltas o la velocidad con la que se mueve la bobina por el campo magnético mayor será el voltaje inducido (Boylestad, 2011).

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \text{ (volts, } V) \quad (2.14)$$

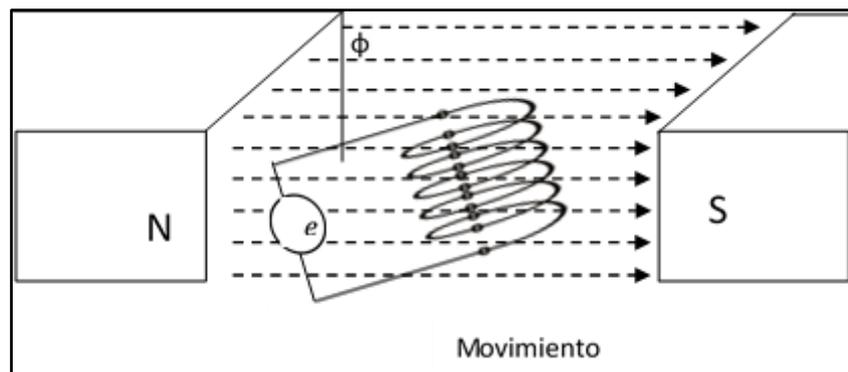


Figura 2.14. Demostración de la ley de Faraday (Boylestad, 2011).

Cuando la corriente que fluye a través de la bobina se incrementa, el flujo que enlaza la bobina también lo hace. Una bobina cerca del flujo magnético variable tendrá un voltaje inducido a través de ella. El resultado que se obtiene es que se induce el voltaje a través de la bobina debido al cambio de la corriente a través de la bobina como se muestra en la figura 2.15.

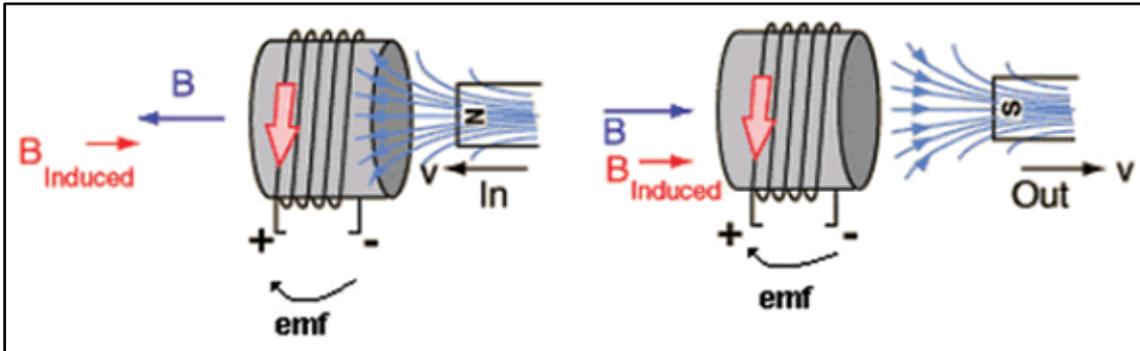


Figura 2.15. Demostración del efecto de la ley de Lenz (Nave, 2001).

En la figura 2.15 se puede observar que la polaridad del voltaje que es inducido a través de la bobina es tal que se opone al nivel creciente de la bobina. La corriente cambiante a través de la bobina induce un voltaje a través de ella opuesto al voltaje aplicado que indica el incremento de la corriente en el primer lugar. Cuanto mayor es la velocidad para cambiar la corriente a través de la bobina, mayor es el voltaje que es inducido que se opone a la réplica de intento de la corriente por crecer en magnitud. La acción que hace el “bloqueo” de la bobina es la razón por la cual los inductores o bobinas también se conocen como bloqueadores. Este efecto es conocido como la ley de Lenz la cual tiene establecido que:

Un efecto inducido siempre se opone a la causa que lo produjo.

La inductancia de una bobina también es capaz de medir el cambio en el flujo que hace el enlace de la bobina debido a un cambio en la corriente que pasa por ella.

$$L = N \frac{d\phi}{di_L} \tag{2.15}$$

La ecuación determina que a mayor número de vueltas o cuanto más grande sea el cambio en el flujo que enlaza la bobina debido a un cambio en particular de la corriente, más grande es el nivel de inductancia. Las bobinas que tienen niveles de inductancia pequeños generan cambios pequeños en el flujo que enlaza la bobina con el mismo



cambio de corriente que lo atraviesa. Si el valor de la inductancia es pequeño el nivel de flujo que enlaza la bobina no cambiara en gran medida, y el voltaje que es inducido a través de ella será pequeño, podemos escribir la ecuación de la siguiente forma (Boylestad, 2011):

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \left( N \frac{d\phi}{di_L} \right) \left( \frac{di_L}{dt} \right) \quad (2.16)$$

Sustituyendo la ecuación obtenemos:

$$e_L = L \frac{di_L}{dt} \text{ (volts, } V) \quad (2.17)$$

En la cual podemos observar la relación que existe entre la bobina y el número de vueltas de esta y el cambio de corriente que existe a través de esta.

Cuando los generadores de cd o ca producen efectos inducidos en la generación de voltajes, se hace uso del símbolo  $e$  al voltaje inducido. La polaridad del voltaje en el análisis de redes de un inductor siempre tendrá una oposición al voltaje aplicado. La siguiente ecuación se utiliza para el voltaje inducido a través de un inductor (Boylestad, 2011).

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \text{ (volts, } V) \quad (2.18)$$

Cuando es mayor la inductancia o el rápido cambio de la corriente que fluye a través de la bobina mayor será el voltaje que es inducido en ella.



Cambiando los voltajes y las corrientes de la ecuación así como la inductancia y la capacitancia. El resultado para la corriente de un capacitor es la siguiente (Boylestad, 2011):

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \text{ (volts, } V) \qquad i_C = C \frac{di_C}{dt}$$

## 2.5 Resonancia

La frecuencia es aquella que determina la resonancia en los circuitos AC por los valores de la resistencia, capacitancia y la inductancia. Existe una condición para los circuitos serie y es simple al decir que la impedancia es mínima y el ángulo de fase es cero (Boylestad, 2011).

### Resonancia serie

La resonancia serie es aquella en la que ocurre cuando las reactancias inductivas y capacitivas son iguales en magnitud, pero existe una cancelación entre ellas ya que se encuentran desfasadas 180 grados. Esta reducción al mínimo se llega a producir en el valor de la impedancia, es bastante útil para las aplicaciones de sintonización. El factor de calidad de la impedancia, depende de R y se caracteriza mediante el valor “Q” del circuito (Boylestad, 2011).

### Circuito resonante en serie

Un circuito resonante es caracterizado por que debe de tener al menos un elemento reactivo y un elemento capacitivo. Siempre habrá un elemento resistivo debido a la resistencia interna de la fuente ( $R_f$ ), la resistencia interna ( $R_i$ ), y a cualquier resistencia que se agregue para el control de la forma de la curva de respuesta ( $R_{diseño}$ ). El circuito básico de la configuración resonante aparece en la figura 2.16 con los elementos



resistivos ya mencionados. Otro tipo de resistencia es la combinación de los elementos resistivos en serie dando un valor total (Boylestad, 2011).

$$R = R_f + R_l + R_d \quad (2.19)$$

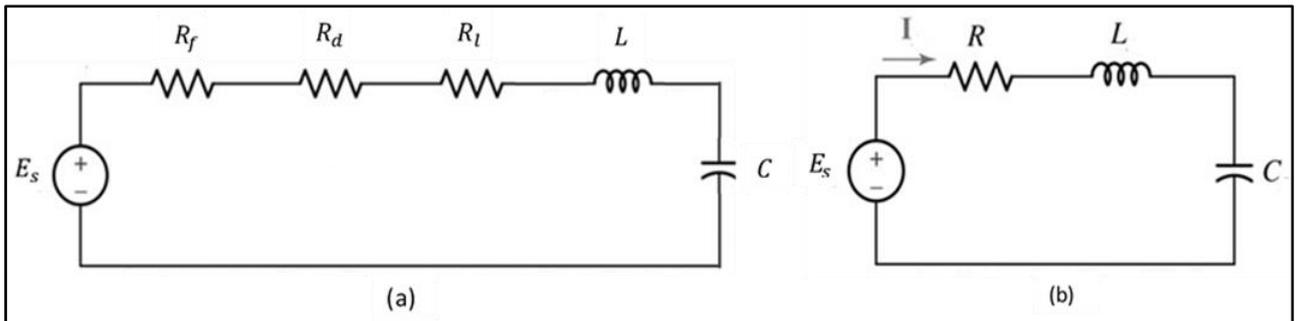


Figura 2.16. Circuito resonante en serie (Boylestad, 2011).

La impedancia total de la red a cualquier frecuencia está dada por (Boylestad, 2011):

$$Z_T = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \quad (2.2)$$

La condición para que la resonancia descrita ocurra es (Boylestad, 2011):

$$X_L = X_C$$

Al eliminar el componente reactivo de la ecuación de la impedancia total. La impedancia total en la resonancia es (Boylestad, 2011):

$$Z_{T_s} = R \quad (2.21)$$



Representa el valor mínimo de  $Z_T$  a cualquier frecuencia. El subíndice s se utiliza para la indicación de condiciones resonantes que se encuentran en serie. La frecuencia resonante se calcula en función de la inductancia y la capacitancia, al obtener la ecuación definida de resonancia (Boylestad, 2011).

$$X_L = X_C$$

Al Sustituir obtenemos:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.22) \quad y \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.23)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.24)$$

O

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.25)$$

Donde:

$f$ = Hertz (Hz)

$L$ = Henries (H)

$C$ = Farads (F)



## 2.6 Factor de calidad (Q)

El factor de calidad Q de un circuito resonante en serie es definido como la relación de la potencia reactiva a la potencia promedio del resistor en resonancia (Boylestad, 2011).

$$Q_s = \frac{\textit{potencia reactiva}}{\textit{potencia promedio}} \quad (2.26)$$

El factor de calidad indica cuánta energía es almacenada (transferencia continua desde un elemento reactivo hasta el otro) comparada con la disipada. Cuanto menor es el nivel de disipación con la misma potencia reactiva, mayor es el factor de calidad  $Q_s$  (Boylestad, 2011).

Sustituyendo la resonancia en lugar de una reactancia inductiva tenemos:

$$Q_s = \frac{I^2 X_L}{I^2 R} \quad (2.27)$$

Y

$$Q_s = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega_s L}{R} \quad (2.28)$$

Si la resistencia R es igual a la resistencia de la bobina ( $R_l$ ) entonces:

$$Q_s = Q_{bobina} = Q_1 = \frac{X_L}{R_l} \quad (2.29)$$



$$R = R_l$$

$Q_l$  Se incrementa con la frecuencia puesto que  $X_L = 2\pi fL$ .

Si hacemos la sustitución:

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

Y después.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

Obtenemos:

$$\begin{aligned} Q_s &= \frac{\omega_s L}{R} = \frac{2\pi f_s L}{R} = \frac{2\pi}{R} \left( \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right) L \\ &= \frac{L}{R} \left( \frac{1}{\sqrt{LC}} \right) = \left( \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L}} \right) \frac{L}{R\sqrt{LC}} \\ Q_s &= \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned} \quad (2.31)$$

La cual da  $Q_s$  en función de los parámetros del circuito (Boylestad, 2011).

## 2.7 Curva $Z_T$ contra frecuencia

La impedancia total del circuito generada por los elementos  $R - L - C$  en serie de la figura 28 a cualquier frecuencia se determina como sigue (Boylestad, 2011):



$$Z_T = R + jX_L - jX_L - jX_C \quad \circ \quad Z_T = R + j(X_L - X_C)$$

La magnitud de la impedancia  $Z_T$  contra frecuencia es determinada por:

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.32)$$

La curva de la relación que existe entre frecuencia e impedancia total para el circuito resonante en serie de la figura 28 se traza aplicando la curva de la frecuencia contra impedancia a cada uno de los elementos de la ecuación de la siguiente forma (Boylestad, 2011):

$$Z_T(f) = \sqrt{[R(f)]^2 + [X_L(f) - X_C(f)]^2} \quad (2.33)$$

Donde  $Z_T(f)$  “significa” la impedancia total en función de la frecuencia. La curva de la inductancia, es una línea recta que cruza el origen con una pendiente igual a la inductancia de la bobina. La expresión matemática para cualquier línea recta en un plano bidimensional está dada por (Boylestad, 2011):

$$y = mx + b$$

Por lo tanto, para la bobina:

$$X_L = 2\pi fL + 0 = (2\pi L)(f) + 0 \quad (2.34)$$

↓

↓

↓

↓



$$y = m \cdot x + b$$

(Donde  $2\pi L$  es la pendiente), y se obtienen la relación que se muestran en la figura 2.17 (Boylestad, 2011).

Para el capacitor:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{o} \quad X_C f = \frac{1}{2\pi C} \quad (2.35)$$

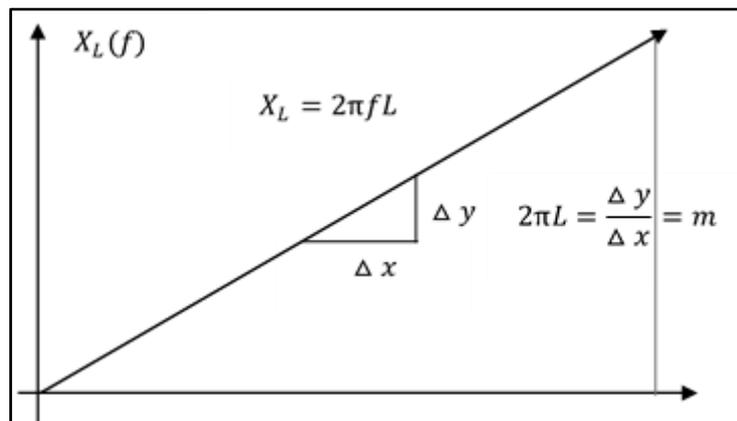


Figura 2.17. Reactancia inductiva contra frecuencia (Boylestad, 2011).

## 2.8 Selectividad

Si se traza la magnitud de la corriente  $I = \frac{E}{Z_T}$  contra la frecuencia para un voltaje fijo aplicado  $E$ , se obtiene la curva que se muestra en la figura 2.18, la cual se eleva desde cero hasta un valor máximo de  $E/R$  (donde  $Z_t$  es un mínimo) y luego se reduce hacia



zero (a medida que  $Z_t$  se incrementa) a ritmo más lento que con el que se alcanzó su valor pico. La curva es la inversa de la curva de impedancia contra frecuencia. Como la curva  $Z_t$  no es absolutamente simétrica con respecto a la frecuencia resonante, la curva de la corriente contra la frecuencia tiene la misma propiedad (Boylestad, 2011).

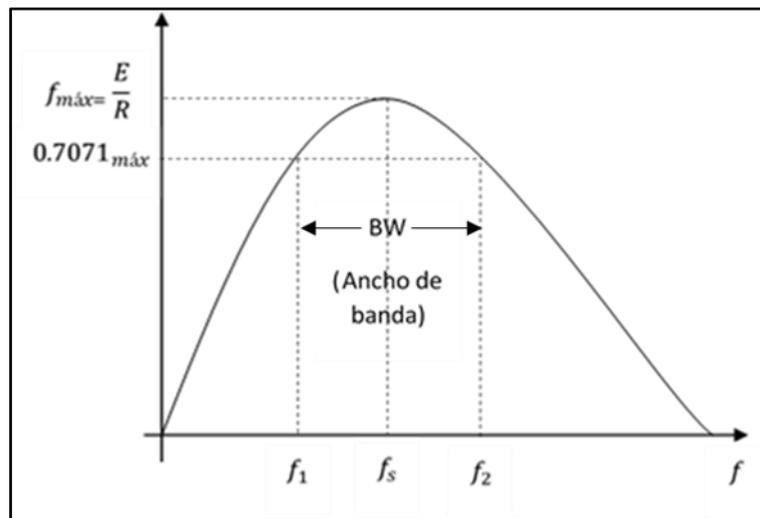


Figura 2.18. Curva  $I$  contra frecuencia del circuito resonante en serie (Boylestad, 2011).

Frecuencias de banda, frecuencias de corte, frecuencias de mediana potencia, frecuencias de esquina aparecen como  $f_1$  y  $f_2$  en la figura 2.18 son el intervalo definido de frecuencias en la cual la corriente se acerca a un valor máximo y su impedancia está a su valor mínimo las frecuencias correspondientes son 0.707. El intervalo que existe entre las dos frecuencias se conoce como ancho de banda (abreviado como  $BW$ , por sus siglas en inglés) del circuito resonante (Boylestad, 2011).

Las frecuencias de mediana potencia son aquellas frecuencias a las que la potencia suministrada es la mitad de la suministrada a la frecuencia resonante (Boylestad, 2011).

$$P_{HPF} = \frac{1}{2} P_{m\acute{a}x} \quad (2.36)$$



Para esta condición se deriva de:

$$P_{m\acute{a}x} = I_{m\acute{a}x}^2 R$$

Y

$$P_{HPF} = I^2 R = (0.7071_{m\acute{a}x})^2 R = (0.5)(I_{m\acute{a}x}^2 R) = \frac{1}{2} P_{m\acute{a}x}$$

La curva en la figura 2.17 se llama curva selectiva. Si la resistencia se reduce con una inductancia o capacitancia fija, el ancho de banda se reduce y la selectividad se incrementa. La relación  $L/C$  se incrementa con la resistencia fija, el ancho de banda se reduce con un incremento en la selectividad.

En función  $Q_s$ , si  $R$  es mayor para la misma  $X_L$ , entonces la función  $Q_s$  es menor, como lo determina la siguiente ecuación  $Q_s = \frac{\omega_s L}{R}$ .

Por consiguiente, un  $Q_s$  pequeño está asociado con una curva resonante que tiene ancho de banda grande y una selectividad pequeña, en tanto que un  $Q_s$  grande indica lo opuesto.

Las frecuencias de banda  $f_1$  y  $f_2$  se determinan para el caso general utilizando primero el hecho de que una reducción de la corriente a 0.707 de su valor resonante corresponde a un incremento de la impedancia igual a  $1/0.707 = \sqrt{2}$  por el valor resonante, el cual es  $R$ .

Sustituyendo  $\sqrt{2}R$  en la ecuación de la magnitud de  $Z_T$ , encontramos que:

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$



La cual cambia a:

$$\sqrt{2}R = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Si sacamos la raíz cuadrada de ambos lados, tenemos que:

$$2R^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$$

Y

$$R^2 = (X_L - X_C)^2$$

Tomando la raíz cuadrada de ambos lados obtenemos:

$$R = X_L - X_C \quad \text{o} \quad R - X_L + X_C = 0$$

Considerando el caso  $X_L > X_C$ , el cual se relaciona con  $f_2$  o  $\omega_2$ . Sustituyendo  $\omega_2 L$  en lugar de  $X_L$  y  $1/\omega_2 C$  en lugar de  $X_C$  y cambiamos ambas cantidades a a izquierda del signo igual, tenemos:

$$R - \omega_2 L + \frac{1}{\omega_2} = 0 \quad \text{o} \quad R\omega_2 - \omega_2^2 L + \frac{1}{C} = 0$$

Las cuales se pueden calcular de la siguiente forma:



$$\omega_2^2 - \frac{R}{L} \omega^2 - \frac{1}{LC} = 0$$

Resolviendo la ecuación cuadrática, obtenemos:

$$\omega_2 = \frac{-(-\frac{R}{L}) \pm \sqrt{[-(\frac{R}{L})]^2 - [-\frac{4}{LC}]}}{2}$$

Y

$$\omega_2 = +\frac{R}{2L} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \frac{4}{LC}}$$

Con

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{4}{LC}} \right] \quad (Hz) \quad (2.37)$$

Se repitió el mismo procedimiento  $X_C > X_L$ :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{4}{LC}} \right] \quad (Hz) \quad (2.38)$$



El ancho de banda ( $BW$ ) se determina:

$$BW = f_2 - f_1$$

Y

$$BW = f_2 - f_1 = \frac{R}{2\pi L} \quad (2.39)$$

Sustituyendo  $\frac{R}{L} = \omega_s/Q_s$  a partir de  $Q_s = \omega_s L/R$  y  $\frac{1}{2\pi} = \frac{f_s}{\omega_s}$  desde  $\omega_s = 2\pi f_s$  obtenemos (Boylestad, 2011).

$$BW = \frac{R}{2\pi L} = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left(\frac{R}{L}\right) = \left(\frac{f_s}{\omega_s}\right) \left(\frac{\omega_s}{Q_s}\right)$$

O

$$BW = \frac{f_s}{Q_s} \quad (2.4)$$

## 2.9 Funcionamiento de un transponder

El voltaje inducido  $v_L$  alcanza valores altos en poco tiempo, se utiliza el resistor  $R_s$  conectado en paralelo con la resistencia de la carga  $R_l$  para la regulación del voltaje inductivo  $v_L$  haciendo un circuito equivalente obtenemos el siguiente vease figura 2.19 (Jose María Ciudad Herrera, 2007):

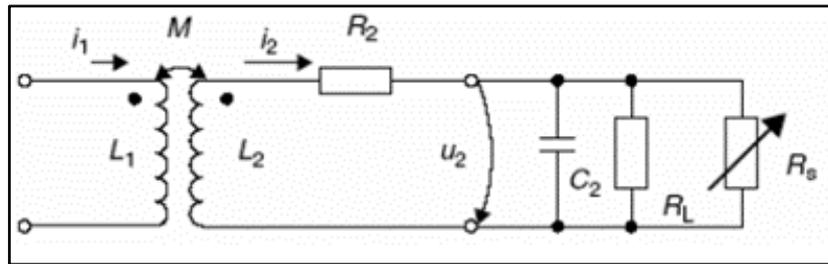


Figura 2.19. Circuito regulador de voltaje en un transponder (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

El campo de interrogación del transponder  $H_{min}$ . Es la mínima intensidad de campo (mayor distancia que existe entre el transponder y reader) a la cual el voltaje inducido  $V_l$  es suficiente para la comunicación con el chip.

El cálculo para determinar  $H_{min}$  es el siguiente:

$$H_{min} = \frac{v_l \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2\right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L}\right)^2}}{\omega \cdot \mu_0 \cdot A \cdot N} \quad (2.41)$$

Cuando la frecuencia de transmisión del lector es igual a la frecuencia de resonancia del transponder, el campo de interrogación  $H_{min}$  tiene su valor mínimo.

Para la optimización del acoplamiento inductivo la frecuencia de resonancia del transponder tiene que ser precisamente igual a la frecuencia de resonancia del lector. Sin embargo en la práctica es muy raro que se genere por algunos factores tales como la fabricación del transponder donde existen tolerancias, las cuales generen desviación en la frecuencia de resonancia o razones técnicas a la hora de la configuración de la frecuencia de resonancia del transponder y la frecuencia de transmisión al hacerse varios lectores y estos afecten a la hora de la comunicación de datos.



La frecuencia de resonancia es calculada como:

$$L_2 C_2 = \frac{1}{(2\pi f_o)^2} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (2.42)$$

Conociendo el campo interrogatorio del transponder se puede conocer el rango de energía asociado a ese rango de alcance del lector. El rango de energía del transponder es la distancia desde la antena del lector y el transponder opere de acuerdo al voltaje inducido  $v_l$  lo podemos observar en la siguiente ecuación:

$$x = \sqrt[3]{\sqrt{\left(\frac{I \cdot N_1 \cdot R^2}{2 \cdot H_{min}}\right)^2} - R^2} \quad (2.43)$$

Donde:

$I$ = corriente que circula por la antena

$R$ = radio de la antena

$N$ = numero de vueltas de la antena

Cuando se incrementa el consumo de corriente una ( $R_L$  pequeña) la sensibilidad del lector aumenta, dado que el rango de energía decrece.

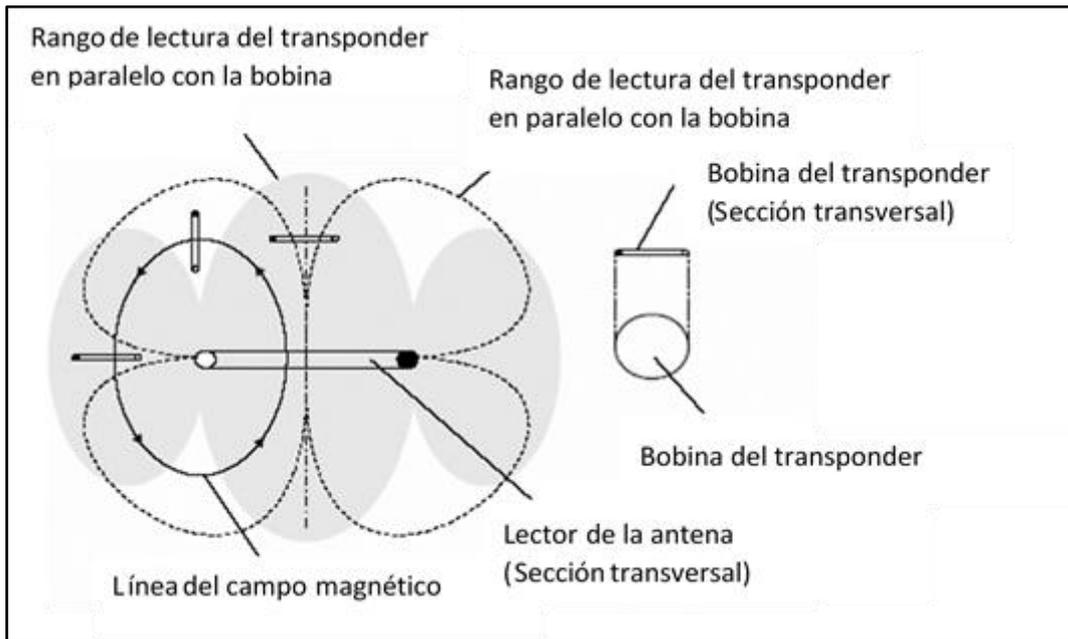


Figura 2.2. Zonas de interrogación de un transponder en diferentes alineamientos (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

El voltaje inducido se llega a presentar cuando la bobina del transponder está en paralelo con la bobina de la etiqueta y cuando existe un ángulo de  $90^\circ$  en ellas el voltaje inducido no existe como se puede observar en la figura 2.2 (Jose María Ciudad Herrera, 2007).

### Capítulo 3. Desarrollo

La mayoría de los sistemas RFID que funcionan en el rango de operación de 13.56 MHz son del tipo pasivos, lo cual indica que no es necesario el uso de baterías en estos



sistemas. Esta es una ventaja que se ve reflejada en el coste y el tiempo de vida de las etiquetas y el campo de aplicación que se puede utilizar dicho sistema. La operación básica que emplea dicho sistema es el acoplamiento inductivo. Principio utilizado en los transformadores.

La comparativa que tiene este rango de operación 13.56 MHz para los sistemas RFID respecto a los utilizados en ultra altas frecuencias UHF. Es que el rango de operación de la antena es igual al lector, lo cual permite alcanzar distancias del orden del diámetro de la antena.

Al conocer todas las características que existen en los diseños de los sistemas RFID y apoyándonos en la información ya existen sobre estos procederemos a desarrollar los cálculos necesarios así como hacer las mediciones correspondientes de acuerdo al funcionamiento que estos tienen para la comprobación de la hipótesis marcada en esta tesis titulada como “Diseño de una antena para dispositivos RFID en la frecuencia de 13.56 MHz” apoyándonos en las características que tiene la tarjeta RFID deseada a leer que se presentan en el anexo1.

### 3.1 Lectores

El tipo de lector que se utilizara para el desarrollo es el de bobina simple ya que solo requerimos de la lectura de la etiqueta y no la interacción que se puede desarrollar entre el lector y la etiqueta que tiene con respecto a los datos véase figura 3.1.

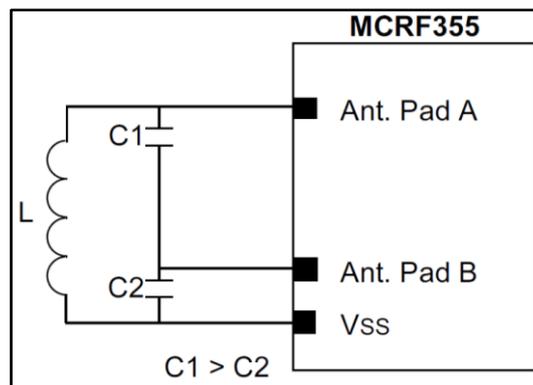


Figura 3.1. Lectores de RFID (a) bobina simple (Youbok Lee).



### 3.2 Polarización

La polarización a utilizar será la vertical ya que el campo eléctrico se propaga en dirección perpendicular a la superficie de la tierra véase figura 3.2.

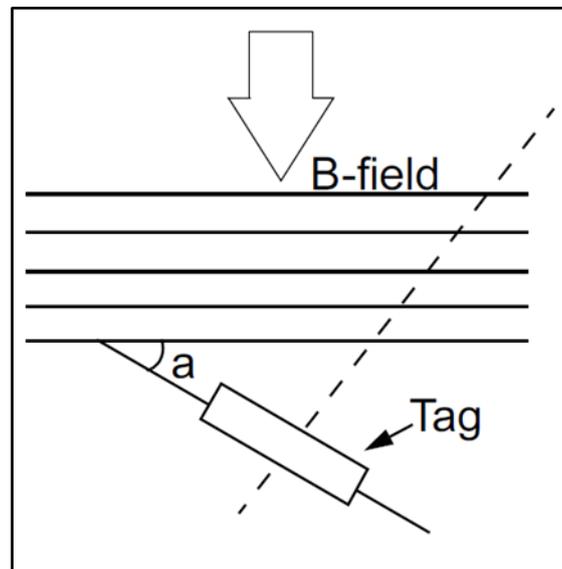


Figura 3.2. Orientación dependiendo del tag de la antena (Youbok Lee).

El voltaje inducido que se encuentra a través de la bobina de la antena está en función del ángulo de llegada de la señal. El voltaje máximo inducido de la antena se da cuando la antena de la etiqueta es puesta en paralelo con la bobina del lector.

### 3.3 Acoplamiento inductivo.

Se escogió este tipo de acoplamiento ya que la tarjeta a leer es del rango de frecuencia de 13.56 MHz y tiene un campo próximo entre la antena y la etiqueta, y su funcionamiento es por medio de energía almacenada véase figura 3.3.

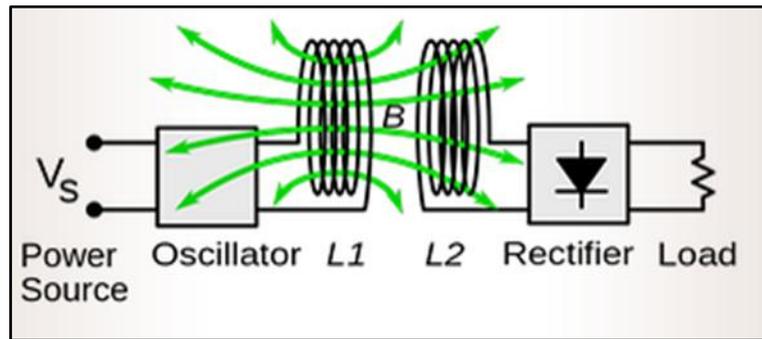


Figura 3.3. Acoplamiento inductivo (es.wiki2.org, 2015).

### 3.4 Los patrones de radiación

El patrón de radiación utilizado en la antena RFID para la frecuencia de 13.56 MHz es omnidireccional ya que es el tipo de radiación clásica y se trata de una bobina. Y su comportamiento con respecto al campo magnético es igual al mostrado en la figura 3.4.



Figura 3.4. Patrón de radiación omnidireccional (Intermec, 2010).

El tipo de modulación a utilizar en el modo inductivo es el Load modulation con subportadora ya que hacemos de la utilización de transistores FET ya que las señales que se generan entre el lector y la etiqueta son muy débiles como se observa en la figura 3.5.

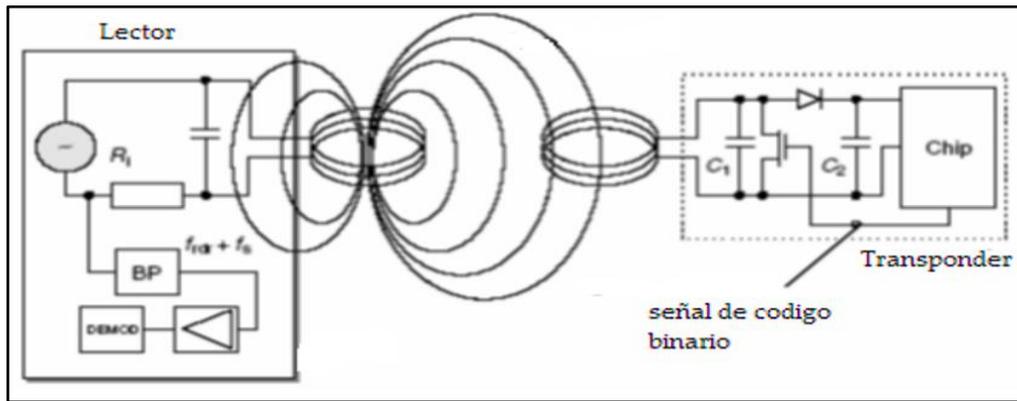


Figura 3.5. Load Modulation (Bettezzati, 2005).

Sabiendo que nuestro sistema de RFID se basa en el funcionamiento de un circuito resonante en serie procedemos a calcular los elementos para que nuestro sistema funcione correctamente y con las características necesarias de lectura de frecuencia para nuestra etiqueta encontradas en el anexo 1.

Determinando que la resistencia de nuestro circuito resonante en serie tenga un valor comercial de  $5\Omega$  y un factor de calidad  $Q = 40$  de acuerdo a la relación que tienen con la frecuencia podremos determinar los valores necesarios para desarrollar nuestra antena y poder detectar nuestra Tag.

### 3.5 Cálculos

Para crear el circuito resonante en serie es necesario calcular el valor de L C y para ello utilizaremos la ecuación (2.29) que está dada por:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (2.29)$$

Al despejar  $X_L$  obtenemos:

$$X_L = Q \cdot R$$

Al obtener la formula correspondiente podemos sustituir los valores y obtener  $X_L$ :



$$X_L = 40 \cdot 5 = 200$$

Ahora podremos calcular el valor de la inductancia con la ecuación (2.34):

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.34)$$

Y al realizar el despeje de  $L$  en la ecuación (2.34) obtendremos el valor de la induccia:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

Al ingresar los valores obtenemos los siguientes resultados:

$$L = \frac{200\Omega}{(2\pi)(13.56\text{MHz})} = 2.347 \mu\text{H}$$

Para el cálculo del capacitor utilizamos la ecuación (2.35) y despejamos a  $C$ :

$$X_L f = \frac{1}{2\pi C} \quad (2.35)$$

$$C = \frac{1}{2\pi X_L f}$$

$$C = \frac{1}{(2\pi)(200\Omega)(13.56\text{MHz})} = 58.7 \text{ pF}$$



### 3.6 Capacitor

Al no existir en el mercado un capacitor con valor de 58.7 pf se recurre a la consulta de bibliografías para poder hacer un arreglo de capacitores y obtener así el valor deseado del capacitor y se encuentra que haciendo un arreglo de capacitores en paralelo la carga total de los capacitores es la suma de la carga de cada capacitor obteniendo la siguiente ecuación.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_n \quad (3.1)$$

Al saber esto se puede deducir que se puede hacer un arreglo de capacitores tal que se obtenga valor deseado con los existentes en el mercado y al saber que en tal existen capacitores de valores como 48.7 pf y 10 pf se procede a hacer un arreglo de capacitores y a corroborar la información con un instrumento de medición el cual hacemos la utilización de un inductometro de la marca BK Precision como se muestra en la figura 3.6.

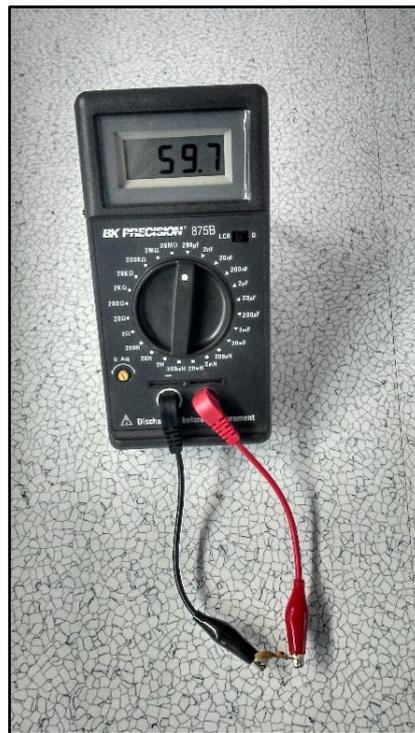


Figura 3.6. Arreglo de capacitores.

### 3.7 Inductor

Una vez conocido el valor que deben de tomar el inductor hacemos uso de la formula (2.10) y para este caso despejamos el número de vueltas para saber la cantidad que debe



de tener para que nos del valor del capacitor deseado suponiendo que nuestro diámetro tenga 1.2” y la longitud ¼”.

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2.10)$$

Despejando N queda de la siguiente forma:

$$N = \sqrt{\frac{Ll}{\mu A}}$$

Para el cálculo de A utilizamos la fórmula 3.2:

$$A = \pi r^2 \quad (3.2)$$

$$A = \pi (.015m)^2 = 706.85 \mu m^2$$

Sustituyendo los valores resolvemos la ecuación para saber el número de vueltas que debe de tener nuestra bobina.

$$N = \sqrt{\frac{(2.34 \mu H)(6.35 mm)}{(4\pi \times 10^{-7} Wb/A \cdot m)(706.85 \mu m^2)}} = 4.09 \approx 4$$

Una vez sabiendo las características que debe de tener nuestra bobina procedemos a crearla y a verificar su valor.

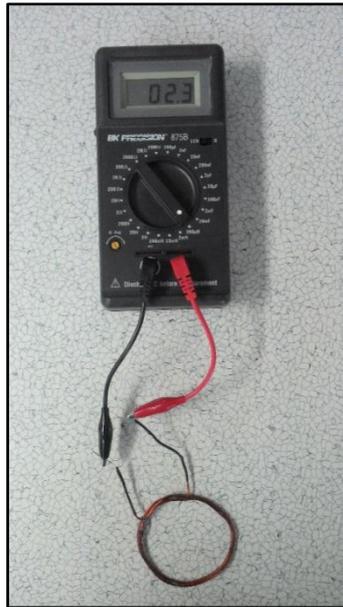


Figura 3.7. Medición de la bobina creada.

Se ajusta el inductómetro a la escala correcta para que marque el valor deseado.



Figura 3.8. Medición de la bobina creada.

Se mide la resistencia que existe en la bobina  $R_L$  con la ayuda del multímetro.

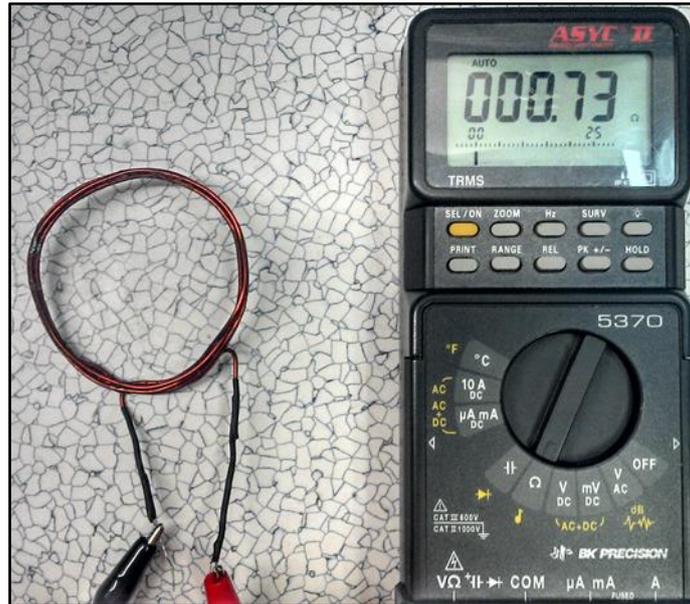


Figura 3.9. Medición de la  $R_L$ .

### 3.8 Circuito resonante serie

Se realiza la comprobación de los componentes al sustituir los valores calculados en la ecuación (2.3).

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.347 \mu H)(58.7 pF)}}$$

$$f_s = 13.55 \text{ MHz} \approx 13.56 \text{ MHz}$$

Frecuencia de operación de nuestra etiqueta a leer.



### 3.9 Factor de calidad

Una vez más se hace la comprobación de nuestro factor de calidad por medio de la ecuación (2.31).

$$Q_s = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.31)$$

$$Q_s = \frac{1}{5 \Omega} \sqrt{\frac{2.347 \mu H}{58.7 pF}}$$

$$Q_s = 39.99 \approx 40$$

### 3.10 Frecuencias de corte y ancho de banda

Realizamos el cálculo de las frecuencias de corte con las ecuaciones (2.37) y (2.38) respectivamente.

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{4}{LC}} \right] \quad (Hz) \quad (2.37)$$



$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{5 \Omega}{2(2.347 \mu H)} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{5 \Omega}{2.347 \mu H} \right)^2 + \frac{4}{(2.347 \mu H)(58.7 pF)}} \right]$$

$$f_2 = 13.89 \text{ MHz}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 + \frac{4}{LC}} \right] \quad (\text{Hz}) \quad (2.38)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{5 \Omega}{2(2.347 \mu H)} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{5 \Omega}{2.347 \mu H} \right)^2 + \frac{4}{(2.347 \mu H)(58.7 pF)}} \right]$$

$$f_1 = 13.22 \text{ MHz}$$

Y para determinar el ancho de banda se hace la utilización de la ecuación (2.4).



$$BW = \frac{f_s}{Q_s} \quad (2.4)$$

$$BW = \frac{13.56 \text{ MHz}}{40} = 339000$$

### 3.11 Transponder

Para nuestro diseño de antena de sistemas RFID de la frecuencia de 13.56 MHz hacemos la etapa de modulación de cualquier tipo de transponder existente en el mercado con la ayuda del siguiente circuito.

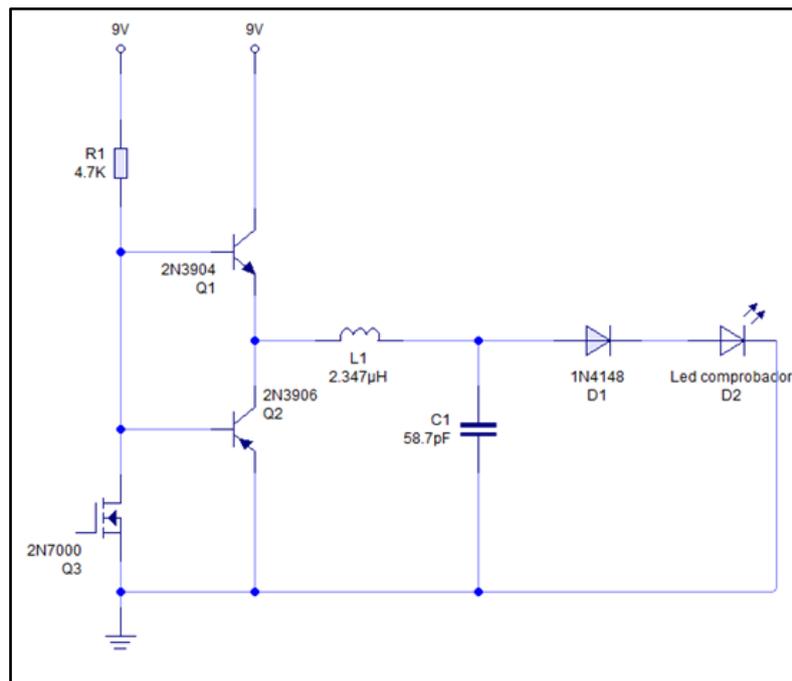




Figura 3.10. Circuito RF (Craig Ross, 2003).

Una vez armado el circuito se mide la corriente que pasa a través del inductor con la ayuda de un multímetro marca BK Precision.



Figura 3.11. Medición de la corriente a través de la bobina.

El circuito de la figura 3.10 es un circuito de RF seguido de un búfer actual y el amplificador medio-puente. El choque de RF se utiliza para filtrar frecuencias superiores que se encuentran en la salida de onda cuadrada de la MCU, dejando la frecuencia fundamental, 13.56 MHz, como una onda sinusoidal a amplificar. El generador de onda cuadrada se ve en la figura 3.12. Los diodos se utilizan en el medio



puente para ayudar a reducir la distorsión de cruce causado desde diferentes puntos del transistor. En nuestro diseño se utilizó el 2N3904 y 2N3906 NPN y PNP transistores BJT con el fin de obtener una mejor ganancia del amplificador, y por lo tanto aumentar el rango de lectura de nuestro circuito.

Para ello se tiene que generar la frecuencia de entrada del circuito RF que es igual a la frecuencia de operación de la etiqueta y se logra realizando un circuito en el cual es empleado un cristal de cuarzo y se pueda observar la frecuencia de operación.

A continuación se muestra el circuito base para la creación de la frecuencia de entrada para la etapa de transponder a realizar.

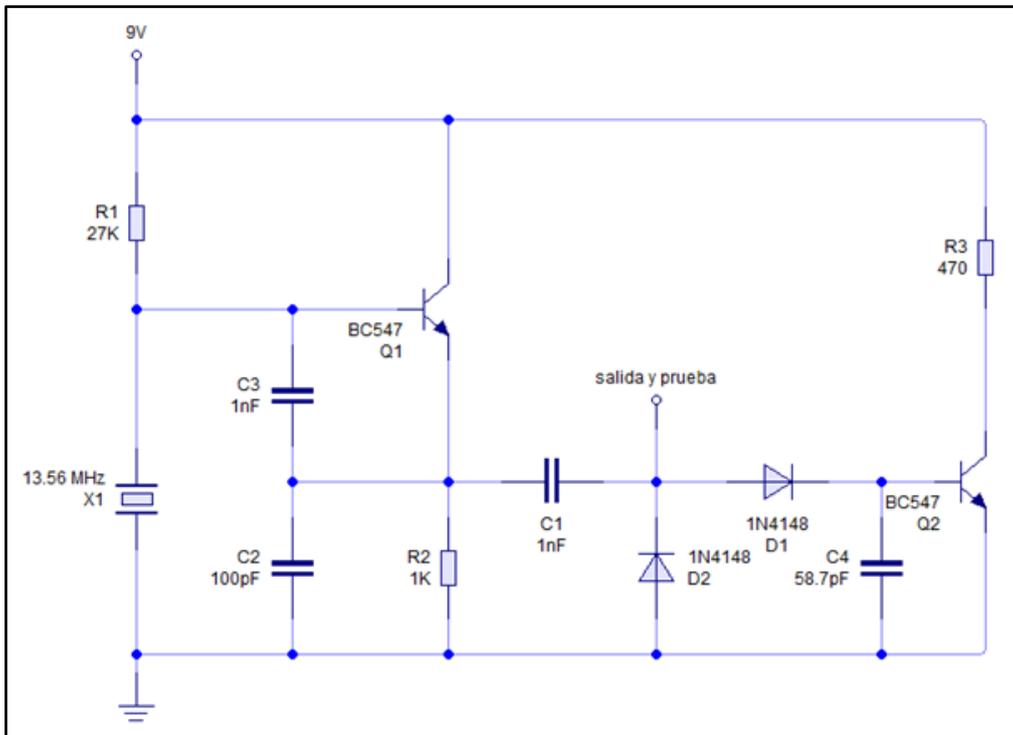


Figura 3.12. Oscilador de cristal frecuencia 13.56 MHz (Craig Ross, 2003).



Procedemos a crear el circuito físico y a comprobar la frecuencia del oscilador para el funcionamiento de la ante con la ayuda de un osciloscopio.

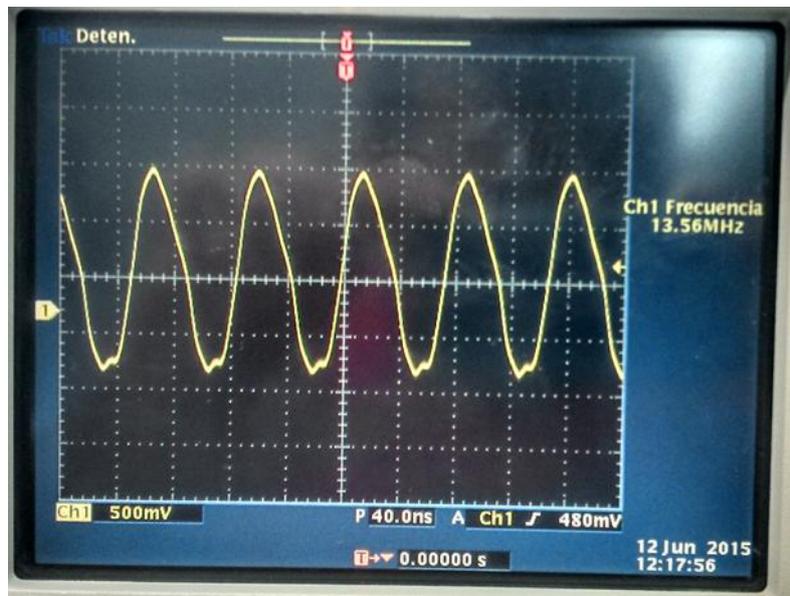


Figura 3.13. Comprobación de la frecuencia del circuito oscilador.  
El oscilador se completa cuando se conecta un cristal de cuarzo. El oscilador comenzará a generar una onda senoidal que es entregada al filtro pasa banda para que la onda senoidal sea adaptada y amplificada y principalmente, que no rechace la frecuencia el filtro.



### 3.12 Voltaje de inducción

Para hacer el cálculo del voltaje inducido utilizamos la ecuación (2.16).

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.16)$$

Sabiendo que  $\phi = AB$

$$e = N \frac{d(A \cdot B)}{dt}$$

Al ser A una constante se puede derivar solo el campo magnético obteniendo la siguiente formula.

$$e = NA \frac{d(B)}{dt}$$

Para calcular  $\beta$  se utiliza la formula (2.5).

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} = \frac{4\pi \times 10^{-7} (0.023 \mu A)}{2(15.24 \text{ mm})} = 9.47^{-12} t \quad (2.5)$$

Al conocer los valores de A y B se puede conocer el voltaje inducido al sustituir los valores en la formula (2.16) y al evaluar el tiempo en un segundo.

$$e = (4)(706.85^{-6}) \frac{d(9.47^{-12})}{d(1 \text{ seg})} = 2.67^{-15}$$



### 3.13 Rango de energía

Calculamos el campo de interrogación mínima del transpondedor con los datos obtenidos anteriormente con la ecuación (2.41).

$$H_{min} = \frac{v_l \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2\right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L}\right)^2}}{\omega \cdot \mu_0 \cdot A \cdot N} \quad (2.41)$$

Para calcular usamos la formula 2.24.

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.24)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(2.34\mu H)(58.7pF)}} = 85.32 \times 10^6$$

$$H_{min} = \frac{2.67^{-15} \cdot \sqrt{88.2 \times 10^3 + \left(1 - 1 + \frac{4.7K\Omega}{.73\Omega}\right)^2}}{(85.32 \times 10^6) \cdot 4\pi \times 10^{-7} \cdot 706.85 \mu m^2 \cdot 4}$$

$$H_{min} = \frac{2.67^{-15} \cdot \sqrt{88.2 \times 10^3 + 41.45 \times 10^6}}{303 \times 10^{-3}}$$

$$H_{min} = \frac{2.67^{-15} \cdot 6.44 \times 10^3}{303 \times 10^{-3}} = 56.74 \times 10^{-12}$$



Una vez realizada esta operación procedemos a calcular el rango de energía dado por la ecuación (2.43).

$$x = \sqrt{\sqrt[3]{\left(\frac{I \cdot N_1 \cdot R^2}{2 \cdot H_{min}}\right)^2} - R^2} \quad (2.43)$$

$$x = \sqrt{\sqrt[3]{\left(\frac{(0.23\mu A) \cdot (4) \cdot (0.015m)^2}{2 \cdot (56.74 \times 10^{-12})}\right)^2} - (0.015m)^2}$$

$$x = \sqrt{\sqrt[3]{\left(\frac{207 \times 10^{-12}}{113 \times 10^{-12}}\right)^2} - (0.015m)^2}$$

$$x = \sqrt{\sqrt[3]{3.35} - 225\mu m^2}$$

$$x = \sqrt{1.49} = 1.22m$$



## Capítulo 4. Resultados

A continuación se hace un resumen de los resultados obtenidos en el desarrollo ya que estos nos indicaran las características de funcionamiento de nuestra antena y así la podremos comparar con otros lectores de sistemas RFID que existen en el mercado.

Tabla 1.4 Resultados de la antena diseñada.

Factor de calidad	40
Frecuencias de corte	13.22 – 13.89 Mhz
Distancia de lectura	1.22m
Indicador	Led
Costo aproximado	\$80.00

Una vez obtenidos nuestros resultados, y desarrollada la antena es posible hacer la comparación con algunas antenas para sistemas RFID que se encuentran en el mercado comercial, para poder así comprobar las características con las que cuenta y si es factible seguir desarrollando antenas de este tipo con los materiales que se utilizan aquí.

Tabla 1.5 Características de lector grabador KRD13M (Ferákmon, s.f.).

Voltaje	5 VDC
---------	-------



Frecuencias de operación	13.56 Mhz
Distancia de lectura	Hasta 5 cm
Costo	

Tabla 1.6 Características Lector PcProx Plus (RFIDeas, s.f.).

Indicadores	Led
Frecuencias de operación	125 Khz y 13.56 Mhz
Distancia de lectura	Entre 2.5 y 7.6 cm
Costo	

Tabla 7. Características lector RFID NFC – SL600 (Stronglink, s.f.).

Voltaje	2.5 a 3.6 VDC
Frecuencias de operación	13.56 Mhz
Distancia de lectura	Hasta 5 cm
Costo aproximado	\$527.00

#### 4.1 Discusión de resultados

La principal observación que se tuvo en este trabajo de investigación fueron los cálculos correspondientes que se realizaron para la fabricación de la antena ya que las matemáticas son exactas pero no así los componentes con los que se fabrican los circuitos electrónicos y con los que opera la antena una vez diciendo esto también cabe señalar que los mismos componentes electrónicos tienen un margen de tolerancia para la operación de los mismos y en los cálculos señala que la distancia máxima de alcance es de 1.22 metros pero realizándolo físicamente se pudo comprobar que la distancia de alcance máximo oscila entre los 3 a 5 cm y observando los diferentes tipos de antenas que existen en el mercado podemos corroborar esta información ya que el alcance máximo que puede tener una de los lectores de sistemas RFID analizados da como resultado 7.6 cm pero siendo hincapié en el tipo de tag que se utiliza para la lectura también depende de la frecuencia en la que operan.



#### 4.2 Conclusiones.

En el trabajo que se acaba de exponer podemos apreciar que la utilización de la tecnología RFID en nuestras vidas se remonta desde la segunda guerra mundial gracias a los trabajos de diferentes investigadores y científicos así como su sistema de detección de objetos predecesor que es el código de barras que hoy en día se sigue utilizando, también se observa la evolución y aplicación que se ha venido desarrollando a lo largo de la década de los 30' hasta nuestros días. También damos a conocer el organismo encargado de la reglamentación en el uso e implementación de la tecnología RFID.

Presentamos el funcionamiento que tiene la tecnología RFID así como los componentes que se deben de tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema RFID, como al igual el tipo de radiación que pueden llegar a presentar.

En el funcionamiento de la tecnología RFID se pueden apreciar diferentes principios físicos y que se analizan detenidamente en este trabajo empezando con lo más esencial definiendo el campo magnético y su funcionamiento, pasando por la construcción de una bobina y los parámetros que deben de tomarse en cuenta y el diseño de la misma una vez obtenida la bobina se mide el voltaje que puede llegar a producir y con esto implementar la ley de Faraday, se estudia el funcionamiento del circuito resonante en serio y los elementos que lo componen y de acuerdo a nuestras necesidades se hacen los cálculos correspondientes para que pueda operar en la frecuencia deseada 13.56 MHz, apreciamos que en este tipo de circuitos tiene un rango de lectura denominado (selectividad) que mientras se va incrementando el ancho de banda disminuye y esto se calculó en función de los elementos que conforman el circuito resonante (resistencia, capacitor e inductor). Al unir varios tipos de circuitería se da lugar a un transponder que es aquel que recibe y manda señales entre la antena y la tag para asegurarse de su correcto funcionamiento.

Al tener los datos de nuestra tarjeta que deseamos detectar realizamos los cálculos necesarios para la creación de los circuitos y comprobamos con ayuda de diferentes instrumentos de medición que los circuitos así como los componentes que se utilizan den los parámetros adecuados o su aproximación para que el funcionamiento sea correcto y, con esto determinar que empleando lo que se expuso en este trabajo nos puede ayudar a la creación de sistemas RFID adaptándonos a las necesidades que nuestro sistema requiere y modificando así los elementos necesarios.



Concluimos que se es posible fabricar una antena para sistemas RFID teniendo los conocimientos adecuados y las características que se tienen de nuestra tarjeta a detectar tag en este trabajo solo se diseña la antena para sistemas RFID que es capaz de detectar una tag pero se es posible leer, escribir o sobrescribir los datos que se cuentan en la misma pero por las limitaciones de tiempo y dinero no se pudieron realizar las siguientes etapas correspondientes para tener un sistema RFID robusto y así poder hacer una aplicación en cualquier sector ya mencionado anteriormente.

## Referencias

- Bettezzati, L. (2005). *RFID: Technologies and Application*. Geneve.
- Bhuptani Manish, M. S. (2005). *RFID Field Guide: Deploying Radio Frequency Identification Systems*. Prentice Hall.
- Blake, R. (2002). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. In R. Blake. D.F : International Thomson Editores, S.A.
- Boylestad, R. L. (2011). *Introducción al análisis de circuitos*. México: PEARSON EDUCATION .
- cooney, E. (2006). *RFID: The complete review of radio frequency identification*.
- Craig Ross, R. G. (2003). *sistema de seguridad de proximidad*. Retrieved from <https://courses.cit.cornell.edu/ee476/FinalProjects/s2006/cjr37/Website/index.htm>
- *Ego México*. (n.d.). Retrieved from "¿Que es la identificación por radio frecuencia o RFID" : [http://www.egomexico.com/tecnologia\\_rfid.html](http://www.egomexico.com/tecnologia_rfid.html)
- *EPC Global Inc.* (2009, septiembre). Retrieved from <http://www.gs1.org/epcglobal>
- *es.wiki2.org*. (2015, Marzo 26). Retrieved from [https://es.wiki2.org/wiki/Transmisi%C3%B3n\\_inal%C3%A1brica\\_de\\_energ%C3%ADa](https://es.wiki2.org/wiki/Transmisi%C3%B3n_inal%C3%A1brica_de_energ%C3%ADa)
- *Ferákmon*. (n.d.). Retrieved from [http://www.feracmon.com/site/rfid.php?gclid=CJqippOM\\_cgCFQczaQodX6oDoQ](http://www.feracmon.com/site/rfid.php?gclid=CJqippOM_cgCFQczaQodX6oDoQ)
- Finkenzeller, K. (n.d.). *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*. JhonWiley & Sons.
- Glover, B. (2006). *RFID Essentials*. United States of America: O'Reilly.
- González, L. M. (2008). *RFID Oportunidades y riesgos, su aplicación práctica*. México, D.F.: ALFAOMEGA.



- *Intermec.* (2010, Febrero). Retrieved from <http://www.intermec.com/products/rfid/indez.aspx>
- *ISO.* (2015, 02 04). Retrieved from [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=2313](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=2313)
- Jary-Pascal Curty, M. D. (2007). *Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems.* Springer.
- Jose María Ciudad Herrera, E. S. (2007). *Estudio, Diseño y simulacion de un sistema RFID basado en EPC.* España.
- Juan, J. L. (2010, octubre). *Tecnologias RFID: ¿En que momento empezar con su adopción?* Retrieved from [http://www.sonda.com/raiz/global/home/ideas/tecnologia\\_rfid\\_en\\_que\\_momento\\_empezar\\_con\\_su\\_adopcion](http://www.sonda.com/raiz/global/home/ideas/tecnologia_rfid_en_que_momento_empezar_con_su_adopcion)
- Lahiri, S. (2005). *RFID Sourcebook.* Prentice Hall.
- Maria, J. (2005). *Estudio, diseño y simulacion de un sistema RFID basado en EPC.* ciudad herrera .
- Miguel Ángel Solano Vérez, J. S. (n.d.). *Universidad de cantabria.* Retrieved from [http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/contaminacion-electromagnetica-medioambiental/material-de-clase-2/apuntes\\_3.pdf](http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/contaminacion-electromagnetica-medioambiental/material-de-clase-2/apuntes_3.pdf)
- Nave, C. R. (2001). HyperPhysics. georgia , atlanta, united state of america.
- *RFIDeas.* (n.d.). Retrieved from <https://www.rfideas.com/products/readers/pcprox-plus>
- *Stronglink.* (n.d.). Retrieved from [www.stronglink-rfid.com/es/rfid-readers/sl600.html](http://www.stronglink-rfid.com/es/rfid-readers/sl600.html)
- *TEXAS INSTRUMENTS.* (2014).
- Violino, B. (2005, Enero 16). *RFID Journal.* Retrieved from <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?1338>
- Wayne, T. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas.* México : PEARSON EDUCACIÓN .
- Weis, A. S. (2003). *Security and Privacy in Radio Frequency Identification Devices.* Massachusetts : tesis de maestria .
- Youbok Lee, P. (n.d.). *Antenna circuit design for RFID Applications.* Microchip Inc.



## **Anexo 1**

### Features

- ISO/IEC 15693-2, -3; ISO/IEC 18000-3 Compliant
- 13.56-MHz Operating Frequency
- 2048-Bit User Memory in 64 blocks  $\times$  32-Bit
- User and Factory Lock Per Block
- Application Family Identifier (AFI)
- Data Storage Format Identifier (DSFID)
- Combined Inventory Read Block Command

### Applications

- Product Authentication
- Library
- Supply-Chain Management
- Asset Management
- Ticketing/Stored Value

### Description

Texas Instruments Tag-it™ HF-I plus transponder inlays consist of 13.56-MHz high-frequency (HF) transponders that are compliant with the ISO/IEC 15693 and ISO/IEC



18000-3 global open standards. These products offer a user-accessible memory of 2048 bits, organized in 64 blocks, and an extensive command set available in six different antenna shapes, with frequency offset for integration into paper, PVC, or other substrates.

The Tag-it HF-I plus transponder inlays are manufactured with TI's patented laser tuning process to provide consistent read performance. Prior to delivery, the transponders undergo complete functional and parametric testing in order to provide the high quality that customers have come to expect from TI.

The Tag-it HF-I plus transponder inlays are well suited for a variety of applications including, but not limited to, product authentication, library, supply-chain management, asset management, and ticketing/stored value applications.

Device Information

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
RI-I02-112A-03	TEF	45.00 mm x 76.00 mm
RI-I02-112B-03	TFF	45.00 mm x 76.00 mm



	PART NUMBER	
	RI-I02-112A-03	RI-I02-112B-03
Supported standard	ISO/IEC 15693-2, -3; ISO/IEC 18000-3	
Recommended operating frequency	13.56 MHz	
Passive resonance frequency (at 25°C)	13.86 MHz ±200 kHz (includes frequency offset to compensate	14.4 MHz ±200 kHz (includes frequency offset to compensate PVC lamination)
Typical required activation field strength to read (at 25°C)	94 dBµA/m <sup>(2)</sup>	94 dBµA/m <sup>(3)</sup>
Typical required activation field strength to write (at 25°C)	97 dBµA/m <sup>(2)</sup>	97 dBµA/m <sup>(3)</sup>
Factory-programmed read-only number	64 bits	



ALEJANDRO SERRANO ROMERO  
DISEÑO DE UNA ANTENA PARA DISPOSITIVOS RFID EN LA FRECUENCIA DE 13.56 MHZ



Memory (user programmable)	2k bits organized in 64 blocks x 32-Bit
Typical programming cycles (at 25°C)	100,000
Data retention time (at 55°C)	>10 years
Simultaneous identification of tags	Up to 50 tags per second (reader/antenna dependent)
Antenna size	45 mm x 76 mm (~1.77 in x ~2.99 in)
Foil width	48 mm ± 0.5 mm (1.89 in ± 0.02 in)
Foil pitch	96 mm +0.1 mm/-0.4 mm (~3.78 in)
Thickness	Chip area: 0.34 mm ±0.02 Antenna area (Al both sides): 0.085 mm ±0.01
Base material	Substrate: PET (polyethylenetherephtalate); Antenna: aluminum
Smallest bending radius allowed	18 mm (~0.71 in)
Operating temperature	-25°C to 70°C
Storage temperature (single inlay)	-40°C to 85°C (warpage may occur at upper temperature range)
Storage temperature (on reel)	-40°C to 40°C

Specifications

(TEXAS INSTRUMENTS, 2014)